

Pusch, Alexander

## **Gestaltung eines Konzepts für Blended Learning im Fachgymnasium, dargestellt an einem Versuch zur Brennstoffzelle**

2011, 61, 30 S. - (Hannover, Univ., Bachelor-Arb., 2010)



Quellenangabe/ Reference:

Pusch, Alexander: Gestaltung eines Konzepts für Blended Learning im Fachgymnasium, dargestellt an einem Versuch zur Brennstoffzelle. 2011, 61, 30 S. - (Hannover, Univ., Bachelor-Arb., 2010) - URN: urn:nbn:de:0111-opus-35668 - DOI: 10.25656/01:3566

<https://nbn-resolving.org/urn:nbn:de:0111-opus-35668>

<https://doi.org/10.25656/01:3566>

### **Nutzungsbedingungen**

Dieses Dokument steht unter folgender Creative Commons-Lizenz: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/deed> - Sie dürfen das Werk bzw. den Inhalt unter folgenden Bedingungen vervielfältigen, verbreiten und öffentlich zugänglich machen sowie Abwandlungen und Bearbeitungen des Werkes bzw. Inhaltes anfertigen: Sie müssen den Namen des Autors/Rechteinhabers in der von ihm festgelegten Weise nennen. Dieses Werk bzw. der Inhalt darf nicht für kommerzielle Zwecke verwendet werden. Die neu entstandenen Werke bzw. Inhalte dürfen nur unter Verwendung von Lizenzbedingungen weitergegeben werden, die mit denen dieses Lizenzvertrages identisch oder vergleichbar sind.

Mit der Verwendung dieses Dokuments erkennen Sie die Nutzungsbedingungen an.

### **Terms of use**

This document is published under following Creative Commons-License: <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/3.0/de/deed.en> - You may copy, distribute and transmit, adapt or exhibit the work in the public and alter, transform or change this work as long as you attribute the work in the manner specified by the author or licensor. You are not allowed to make commercial use of the work. If you alter, transform, or change this work in any way, you may distribute the resulting work only under this or a comparable license.

By using this particular document, you accept the above-stated conditions of use.



### **Kontakt / Contact:**

peDOCS  
DIPF | Leibniz-Institut für Bildungsforschung und Bildungsinformation  
Informationszentrum (IZ) Bildung  
E-Mail: [pedocs@dipf.de](mailto:pedocs@dipf.de)  
Internet: [www.pedocs.de](http://www.pedocs.de)

Mitglied der

  
Leibniz-Gemeinschaft

# Bachelorarbeit

**Gestaltung eines Konzepts für Blended Learning im Fachgymnasium,  
dargestellt an einem Versuch zur Brennstoffzelle**

**Zentrum für Didaktik der Technik**

**Gottfried Wilhelm Leibniz Universität Hannover**

Name:	Alexander Pusch
Matrikelnummer:	2545680
Studiengang:	Bachelor of Science in Technical Education
Fachrichtung:	Metalltechnik
Unterrichtsfach:	Mathematik
Prüfungsfach:	Didaktik der beruflichen Fachrichtung
Abgabedatum:	24.09.2010
Erstprüfer:	Akad. Oberrat Andreas Weiner
Zweitprüfer:	Dipl.-Ing., Dipl.-Berufspäd. Wolfgang Möller

# Inhaltsverzeichnis

<b>1. Einleitung.....</b>	<b>Seite 1</b>
---------------------------	----------------

<b>2. Allgemeine Aspekte der Brennstoffzelle.....</b>	<b>Seite 3</b>
---	----------------

2.1 Energiepolitische Konsequenzen	Seite 3
2.2 Verschiedene Energieträger und Antriebssysteme	Seite 5
2.2.1 Primäre und sekundäre Energieträger	Seite 5
2.2.2 Antriebssysteme in der Fahrzeugtechnik	Seite 6
2.2.3 Vergleich der Antriebssysteme	Seite 9
2.3 Historische Eckpunkte	Seite 11
2.4 Theoretische Grundlagen der Brennstoffzelle	Seite 12
2.4.1 Definitionen chemischer Grundbegriffe	Seite 12
2.4.2 Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle	Seite 13
2.4.3 Aufbau und Funktion eines Brennstoffzellen-Stacks	Seite 15
2.5 Wasserstoff als Energieträger für die Brennstoffzelle	Seite 16
2.5.1 Eigenschaften von Wasserstoff	Seite 16
2.5.2 Erzeugung von Wasserstoff	Seite 16
2.5.3 Speicherung von Wasserstoff	Seite 18
2.5.4 Die Vision der nachhaltigen Wasserstoff-Wirtschaft	Seite 20
2.6 Vor- und Nachteile der Brennstoffzellentechnologie	Seite 20
2.7 Ausblick	Seite 22

<b>3. Theorie der didaktischen Konzeption.....</b>	<b>Seite 23</b>
--	-----------------

3.1 Einleitende Worte	Seite 23
3.2 Definition des Blended Learning	Seite 23
3.3 Voraussetzungen für den Einsatz von E-Learning an Schulen	Seite 24
3.4 Lehr-/Lernmethoden im E-Learning	Seite 25
3.5 Kategorisierung von E-Learning-Software	Seite 26
3.6 Gestaltungsansätze des Blended Learning	Seite 28
3.7 Leitfragen einer E-Learning-Didaktik	Seite 29
3.8 Konzeption von E-Learning-Software	Seite 29
3.9 Gestaltung von E-Learning-Software	Seite 30
3.10 Evaluation von E-Learning-Software	Seite 31

3.11 Betreuung der Lernenden in E-Learning-Sequenzen	Seite 32
3.12 Motivation als wichtiger Bestandteil einer E-Learning-Sequenz	Seite 33
3.13 Argumente für und gegen den Einsatz von E-Learning	Seite 35

#### **4. Gestaltung der didaktischen Konzeption.....Seite 37**

4.1 Vorangehende Bemerkung	Seite 37
4.2 Analyse der Rahmenrichtlinien	Seite 37
4.3 Beschreibung des Schülerarbeitskoffers	Seite 38
4.4 Bewertung des Schülerarbeitskoffers	Seite 40
4.5 Überlegungen im Vorfeld der didaktischen Konzeption	Seite 41
4.6 Erste Phase der Unterrichtseinheit	Seite 43
4.7 Zweite Phase der Unterrichtseinheit	Seite 46
4.8 Dritte Phase der Unterrichtseinheit	Seite 49
4.9 Vierte Phase der Unterrichtseinheit	Seite 55
4.10 Abschließende Evaluation der Unterrichtseinheit	Seite 57

#### **5. Fazit.....Seite 59**

#### **6. Anhang.....Seite 60**

6.1 Erklärung des Prüflings der selbstständigen Verfassung der Arbeit
6.2 Aufgabenstellung der Bachelorarbeit
6.3 Entwickelte Lernmaterialien und ergänzende Anmerkungen
6.4 Literaturangaben



## 1. Einleitung

Fast täglich werden in Diskussionen aktuelle Probleme unserer Energiewirtschaft behandelt. Sei es bezüglich des stetig wachsenden Energiebedarfs der Weltbevölkerung, der derzeit verwendeten Energieträger und ihrer Verfügbarkeit oder der Belastung der Umwelt durch die Emissionen von Schadstoffen. Jüngste Ereignisse wie der Untergang einer Ölplattform im Golf von Mexiko und die Demonstrationen gegen die Atomenergie verdeutlichen die Lage. Die Brennstoffzellentechnologie innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft stellt eine zukunftssträchtige Alternative dar, elektrische Verbraucher auf umweltfreundliche Weise versorgen zu können. Dabei werden weder endliche Ressourcen benötigt noch giftige Schadstoffe an die Umgebung abgegeben.

Im Rahmen der vorliegenden Bachelorarbeit ist ein Konzept zu gestalten, wie den Schülerinnen und Schülern eines Fachgymnasiums für Technik die Thematik der Brennstoffzellentechnologie unter Berücksichtigung didaktischer Gesichtspunkte näher gebracht werden kann. Für das zu entwickelnde Lehr-/Lernarrangement wird ein Ansatz im Sinne des Blended Learning gewählt, bei dem E-Learning-Elemente in didaktisch sinnvoller Weise mit Präsenzunterricht verknüpft werden. Als praktischer Bestandteil des Konzepts wird eine auf Schülerarbeitskoffern basierende Versuchsreihe eingebunden, die neben der Erklärung physikalisch-chemischer Grundlagen auch dem Aufzeigen von Funktionsprinzipien und Wirkungszusammenhängen dient.

Die Bachelorarbeit ist in drei große Kapitel strukturiert. Zunächst wird die Brennstoffzellentechnologie aus verschiedenen Blickwinkeln betrachtet. Der Einstieg in diesen Themenbereich erfolgt dabei über die Problematik der derzeitigen Energiewirtschaft. Der häufig verwendete Bezug zu der Fahrzeugtechnik dient der Veranschaulichung einzelner Sachverhalte und soll nicht den Eindruck erwecken, dass die Brennstoffzelle ausschließlich im Verkehrssektor im Fokus stehe. Bei allen Beschreibungen beziehe ich mich auf die sogenannte Proton-Exchange-Membrane-Fuel-Cell (kurz: PEMFC), die durch das breite Einsatzspektrum dem am häufigsten verwendeten Brennstoffzellentyp entspricht. Im anschließenden großen Abschnitt wird der Begriff des Blended Learning, speziell die E-Learning-Komponente, aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet, wobei den didaktischen Aspekten besondere Aufmerksamkeit verliehen wird. Auf Basis dieser Erkenntnisse und allgemeingültiger didaktischer Grundprinzipien wird im letzten Kapitel die Konzeption zur



umfassenden Vermittlung der Brennstoffzellentechnologie vorgestellt. Bei den Erläuterungen zu den einzelnen Phasen der Unterrichtseinheit werden zentrale Leitfragen hinsichtlich Didaktik und Methodik beantwortet und begründet.

Als Orientierung zum Umgang mit bibliographischen Angaben ist das Buch *Arbeitstechniken Literaturwissenschaft* von Eckhardt Meyer-Krentler und Burkhard Moennighoff herangezogen worden. Alle Zitate sind dementsprechend mit Fußnoten verknüpft, sodass die genaue Quellenangabe ohne Umblättern direkt auf derselben Seite eingesehen werden kann. Aus Gründen der besseren Lesbarkeit wird in der gesamten Arbeit der Ausdruck *Schülerinnen und Schüler* durch den Terminus *Schüler* ersetzt.

## 2. Allgemeine Aspekte der Brennstoffzelle

### 2.1 Energiepolitische Konsequenzen

Vor einigen Jahren wurde von Experten der Energiebranche angekündigt, dass sich in naher Zukunft die Brennstoffzelle als umweltfreundlichere Alternative zu konventionellen Energiewandlern wie den Verbrennungskraftmaschinen durchsetzen werde. Doch die Euphorie von einem neuen Zeitalter der Energiewirtschaft wird schnell durch die Realität ausgebremst, denn bis heute ist dieser Durchbruch nicht erfolgt. Der Großteil der benötigten Energie wird derzeit aus Uran und den fossilen Energieträgern Erdgas, Erdöl und Kohle gewonnen. Neben der enormen Umweltbelastung stellt die Frage nach der zukünftigen Verfügbarkeit dieser Energieträger ein weiteres Problem dar. Die genannten Rohstoffe sind erschöpflich und stehen somit nicht unendlich lange zur Verfügung.

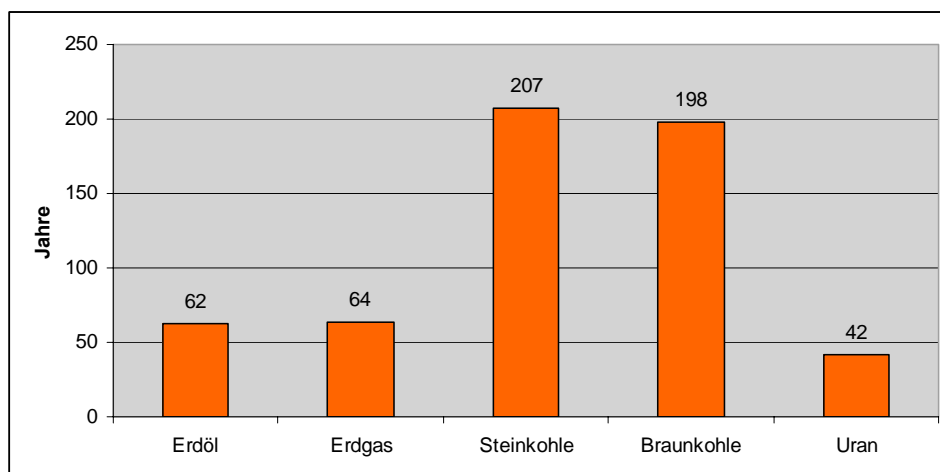


Abb. 2.1: Reichweite von derzeit bekannten Reserven<sup>1</sup>

Angemerkt sei an dieser Stelle, dass sich die angegebenen Jahreswerte in Abbildung 2.1 auf einen gleich bleibenden Energieverbrauch beziehen. Aufgrund der zunehmenden Weltbevölkerung und des steigenden Weltenergieverbrauchs kann davon ausgegangen werden, dass sich trotz umfangreicher Energiesparmaßnahmen in allen Bereichen die Reichweite der aufgezeigten Energieträger verringern wird.

<sup>1</sup> in Anlehnung an Eichlseder, Helmut; Klell, Manfred: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008. S. 5.



Durch die Tatsache der begrenzten Ressourcen steht außer Frage, dass sich in den kommenden Jahren die Energiewirtschaft weg von fossilen Rohstoffen hin zu regenerativen Energien orientieren muss. Da sich ein neues Stadium im Energiesektor nicht einfach oktroyieren lässt, ist dieser Wandel sehr bald erforderlich. Bedingt durch die für den Umbau der Energiesysteme benötigte Zeit von bis zu 50 Jahren<sup>2</sup>, lässt sich beim Betrachten des Diagramms feststellen, dass gegen Ende dieser Umstrukturierung die Ressourcen Erdöl, Erdgas und Uran nur noch in geringen Mengen oder gar nicht mehr vorhanden sein werden.

Besonders für den von Erdöl und Erdgas stark abhängigen Verkehrssektor wird die Rohstoffverknappung gravierende Folgen haben. Während die privaten Haushalte theoretisch weiterhin durch Kohlekraftwerke versorgt werden könnten, unterliegt der Verkehrssektor dem Druck, aufgrund der versiegenden Ölquellen alternative Antriebskonzepte mit alternativen Energielieferanten zu erforschen. Da sich batteriebetriebene Fahrzeuge aufgrund des langen Ladevorgangs und der problematischen Energiespeicherung bis heute nicht durchsetzen konnten<sup>3</sup>, gilt die Brennstoffzelle als zukunftssträchtiges Antriebssystem in der Fahrzeugtechnik, sofern die hierfür benötigten Bedingungen, allen voran eine flächendeckende Wasserstoffstruktur, erfüllt werden können. Die Brennstoffzelle wandelt die chemische Energie des eingesetzten Energieträgers Wasserstoff in elektrische Energie um, die über einen Elektromotor die Antriebsachse in Rotation versetzt und schließlich für den Vortrieb des Fahrzeugs sorgt. Der zentrale Vorteil dieser Antriebsvariante gegenüber Verbrennungskraftmaschinen ist die lokale Emissionsfreiheit beim Betrieb des Fahrzeugs.

Derzeit forschen alle größeren Automobilhersteller an elektrisch betriebenen Fahrzeugen mit Brennstoffzellen. Auch die konventionellen Antriebe werden weiterentwickelt. Doch auf diesem Gebiet finden nur noch verhältnismäßig kleine Fortschritte statt, sodass kaum noch Steigerungen des Wirkungsgrades möglich sind<sup>4</sup>. Durch die erwarteten zunehmenden Energiepreise steht der Begriff des Wirkungsgrades von Energiewandlern immer mehr im Vordergrund. Auch in diesem Aspekt unterliegen Fahrzeuge mit Verbrennungskraftmaschinen den brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen.

---

<sup>2</sup> Vgl. Kattentidt, Björn: Entwicklung eines elektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzelle für Personenkraftwagen. Aachen: Shaker 2003. S. 13.

<sup>3</sup> Vgl. Naunin, Dietrich u. a.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Technik, Strukturen und Entwicklungen. 3. Auflage. Renningen: Expert 2004. S. 20.

<sup>4</sup> Vgl. Geitmann, Sven: Wasserstoff & Brennstoffzellen. Die Technik von morgen. Oberkrämer: Hydrogeit 2004. S. 14.





Antriebssysteme mit einer Brennstoffzelle werden in Zukunft die Konkurrenz für herkömmliche Antriebe mit Verbrennungsmotoren darstellen. Vor ihrer Markteinführung ist sicherzustellen, dass sie sich im Nutzwert mit konventionell betriebenen Fahrzeugen vergleichen lassen. Die Kunden der Automobilhersteller zeigen sich zwar umweltbewusster, sind aber nur in geringem Maße bereit, nachteilige Konsequenzen neuartiger Antriebskonzepte in Kauf zu nehmen. Auch wenn es schon deutliche Fortschritte in der Entwicklung von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen gibt, besteht noch weiterhin großer Forschungsbedarf auf diesem Gebiet.

## **2.2 Verschiedene Energieträger und Antriebssysteme**

### **2.2.1 Primäre und sekundäre Energieträger**

Bei der genaueren Betrachtung von Energiequellen wird zwischen primären und sekundären Energieträgern differenziert. Primäre Energieträger kommen in der freien Natur vor und beinhalten chemische beziehungsweise physikalische Energie. Sie sind noch nicht in eine andere Energieform umgewandelt worden. Sekundäre Energieträger kommen in der freien Natur nicht vor. Sie werden durch die Umwandlung von primären Energieträgern erzeugt.

Die primären Energieträger<sup>5</sup> lassen sich in vier übergeordnete Gruppen unterteilen: Zu den fossilen Energieträgern (1) zählen die Ressourcen Erdöl, Erdgas und Kohle. Sie bestehen aus Kohlenwasserstoffverbindungen, bei deren Verbrennung das Treibhausgas Kohlenstoffdioxid frei wird. Auch pflanzliche Energieträger (2) setzen sich aus Kohlenwasserstoffverbindungen zusammen. Diese entstehen während der Fotosynthese durch das Zusammenwirken von Kohlenstoffdioxid und Sonnenenergie innerhalb der Pflanze. Durch die Bindung des Kohlenstoffdioxids gilt die Verbrennung pflanzlicher Energieträger als CO<sub>2</sub>-neutral. Der nukleare Energieträger Uran (3), der zuvor angereichert wurde, dient als Brennstoff für die Kernspaltung, bei der Energie freigesetzt wird. Allerdings stellt die Endlagerung der radioaktiven Produkte nach wie vor ein großes Problem dar. Regenerative Energieträger (4) sind die unbegrenzt zur Verfügung stehenden Energiequellen Sonne, Wind und Wasser. Ihr Vorteil besteht in der emissionsfreien und somit umweltfreundlichen Nutzbarkeit.

---

<sup>5</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 7-8.



Bei den sekundären Energieträgern<sup>6</sup> werden hauptsächlich drei Gruppen unterschieden: Flüssige Kraftstoffe (1) sind Kohlenwasserstoffverbindungen, die durch die chemische Umwandlung von fossilen und pflanzlichen Energieträgern entstehen. Benzin und Diesel sind typische Beispiele für diese Kraftstoffe. Elektrischer Strom (2) ist aufgrund des vergleichsweise einfachen Transports der meist verwendete Energieträger, der dem Endabnehmer zur Verfügung gestellt wird. Diese Form der Sekundärenergie kann aus allen Primärenergieträgern gewonnen werden. Der Wasserstoff (3) als Energieträger der Zukunft kommt in der Natur nicht eigenständig, sondern nur in Form von Verbindungen vor. Auch er kann aus allen Primärenergieträgern gewonnen werden. Nutzt man hierbei regenerative Energien, so wird der Wasserstoff emissionsfrei hergestellt.

### 2.2.2 Antriebssysteme in der Fahrzeugtechnik

Es ist davon auszugehen, dass aufgrund der Ressourcenverknappung und der Umweltbelastung der Verbrennungsmotor in der Zukunft nicht mehr das am meisten verbreitete Antriebssystem in der Fahrzeugtechnik sein wird. Derzeit bieten größere Automobilhersteller Fahrzeuge mit Elektro-Hybridantrieben an, bei denen ein Verbrennungsmotor mit einem Elektromotor zusammenarbeitet. Auch wenn diese Antriebsvariante dem Verbrennungsmotor gegenüber effizienter ist<sup>7</sup>, benötigt sie den fossilen Energieträger Erdöl und stellt somit auch nur eine Übergangslösung dar. Es kann davon ausgegangen werden, dass der Elektromotor, gespeist mit elektrischem Strom aus einer Brennstoffzelle, die zentrale Rolle eines zukünftigen Antriebssystems in der Fahrzeugtechnik einnehmen wird. Im Folgenden werden diese drei unterschiedlichen Antriebsvarianten näher erläutert, wobei besonders auf die Funktionsweise der brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeuge eingegangen werden soll.

Bis auf wenige Ausnahmen erfolgt der Antrieb von Fahrzeugen über einen Verbrennungsmotor. Als Energielieferanten dienen die aus Erdöl gewonnenen Sekundärenergieträger Benzin oder Diesel. Der Verbrennungsmotor wandelt die chemische Energie dieser Kraftstoffe in mechanische Energie (Rotationsenergie) um. Über die Antriebsachse, die mit der Abtriebswelle des Getriebes verbunden ist, wird schließlich für den Vortrieb des Fahrzeugs gesorgt. Um den vergleichsweise geringen Wirkungsgrad dieses

---

<sup>6</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 9.

<sup>7</sup> Vgl. Naunin, D.: Elektrofahrzeuge. S. 67.



Antriebssystemen zu erhöhen, setzt die Automobilindustrie zunehmend auf das Downsizing<sup>8</sup>. Hinter diesem Begriff verbirgt sich die Verringerung des Hubraums verbunden mit einer Aufladung durch einen Abgasturbolader oder einen Kompressor, wobei die Leistungsabgabe gleich bleibt, aber der Kraftstoffverbrauch gesenkt wird.

Hybridantriebe zeichnen sich dadurch aus, dass sie im Gegensatz zu konventionell angetriebenen Fahrzeugen über mindestens zwei verschiedene Energiewandler und Energiespeichersysteme verfügen<sup>9</sup>. Bei der bekanntesten Hybridart, dem Elektro-Hybrid, werden im Antriebsstrang ein Verbrennungsmotor und ein Elektromotor miteinander kombiniert. Je nach Fahrweise kann das Fahrzeug nur mit dem Verbrennungsmotor, nur mit dem Elektromotor oder im Hybridmodus mit beiden Motoren bewegt werden. Der Betrieb mit dem Elektromotor, der bereits von Anfang an ein hohes Drehmoment bereitstellt, eignet sich besonders zum Anfahren und bei geringen Geschwindigkeiten, also hauptsächlich für Stadtfahrten. Der Verbrennungsmotor hingegen kommt bei höheren Geschwindigkeiten zum Einsatz, also vor allem bei Fahrten auf Landstraßen oder Autobahnen. Bewegt sich das Fahrzeug im Hybridmodus, so wird der Verbrennungsmotor durch den Elektromotor unterstützt. Die mechanische Energie des Verbrennungsmotors kann mittels Generator in elektrische Energie umgewandelt, im Akkumulator gespeichert und dem Elektromotor zur Verfügung gestellt werden. Zu dem gegenüber dem konventionellen Antriebssystem niedrigeren Kraftstoffverbrauch trägt besonders der Einsatz des Generators bei. Dieser wandelt beim Bremsen oder im Schubbetrieb die kinetische Energie des Fahrzeugs, genauer gesagt die Rotationsenergie der Antriebsachse, in elektrische Energie um (Brems- und Schubenergieerückgewinnung). Diese wird dem Akkumulator zugeführt und kann anschließend zum Betreiben des Elektromotors genutzt werden.

Der Antriebsstrang eines brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugs besteht aus einem Brennstoffzellen-System, einem Dreiphasen-Wechselrichter, dem Elektromotor, dem Getriebe und der Antriebsachse. Die Basis dieses Antriebskonzepts ist das Brennstoffzellen-System, das aus den Komponenten Brennstoffzellen-Stack, Wasserstoffversorgung, Luftversorgung und Kühlsystem besteht<sup>10</sup>.

---

<sup>8</sup> Vgl. Gossen, Frank: Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu weiterentwickelten konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrzeugwesen 2000. S. 24.

<sup>9</sup> Vgl. Naunin, D.: Elektrofahrzeuge. S. 67.

<sup>10</sup> Vgl. Naunin, D.: Elektrofahrzeuge. S. 132-135.

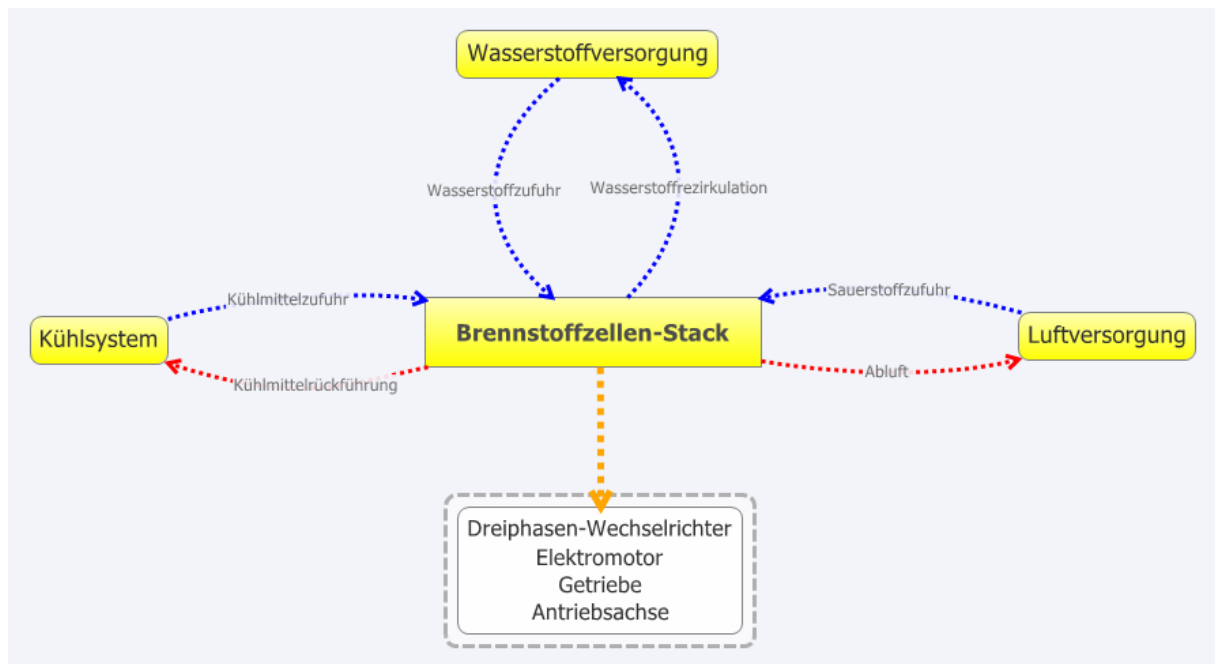


Abb. 2.2: Das Brennstoffzellen-System

Im Brennstoffzellen-Stack, dem Kern des Systems, erfolgt die Umwandlung der chemischen Energie des Wasserstoffs in elektrische Energie. Da eine einzelne Brennstoffzelle nicht genügend Leistung zur Versorgung des Elektromotors bereitstellen kann, werden mehrere Zellen in einem Stapel (englisch: Stack) in Reihe geschaltet. So steht eine erheblich größere Spannung zur Verfügung und demnach auch wesentlich mehr Leistung (Leistung = Spannung x Stromstärke). Die Grundlage für die energetische Umwandlung ist die Reaktion von Wasserstoff mit Sauerstoff zu Wasser. Hierbei leisten freiwerdende Elektronen elektrische Arbeit in Form von Gleichstrom. Da der Elektromotor zum Betrieb aber Wechselstrom benötigt, wird diesem ein Dreiphasen-Wechselrichter zur Bereitstellung von Wechselstrom vorgeschaltet.

Die Wasserstoffversorgung setzt sich aus einem Wasserstoff-Tank, der Dosiereinheit und einem Rezirkulations-Kompressor zusammen. Dem Brennstoffzellen-Stack wird über die Dosiereinheit ein Überschuss an Wasserstoff zugeführt. Dadurch wird sichergestellt, dass alle einzelnen Brennstoffzellen innerhalb des Stacks in ausreichendem Maße mit Wasserstoff umspült werden können und so auch die maximal abrufbare Leistung erreicht werden kann. Um die chemische Energie des überschüssigen Wasserstoffs, der in den Brennstoffzellen nicht sofort reagieren konnte, nicht ungenutzt an die Umwelt abzugeben, wird dieser mittels Rezirkulations-Kompressor zurück in die Wasserstoffversorgung gespeist und kann anschließend wieder den Brennstoffzellen zugeführt werden.



Der von dem Stack benötigte Sauerstoff wird über die Luftversorgung bereitgestellt. Diese besteht aus einem Luft-Kompressor und einer Expansionsturbine, die über eine Welle miteinander verbunden sind. Der elektrisch angetriebene Kompressor verdichtet die Luft und fördert so den benötigten Sauerstoff direkt zu den Brennstoffzellen. Um die Energie der aus dem Stack strömenden Abluft, sauberen Wasserdampfes, zu nutzen, ist eine Expansionsturbine nachgeschaltet. Diese wandelt einen Teil der Strömungsenergie in Rotationsenergie um, die über die Welle an den Kompressor weitergegeben wird. Somit lässt sich der elektrische Antrieb zur Luftkompression entlasten und folglich energetisch effizienter arbeiten.

Da bei dem Zusammenwirken von Wasserstoff und Sauerstoff Wärme entsteht, benötigt der Brennstoffzellen-Stack zudem ein Kühlsystem. Eine Zirkulationspumpe leitet das durch diese chemische Reaktion erwärmte Kühlmittel zu einem Wärmetauscher. Nach der Abgabe der thermischen Energie wird dieses anschließend dem Stack wieder zugeführt und kann für ausreichende Kühlung sorgen.

Das Privileg brennstoffzellenbetriebener Fahrzeuge gegenüber anderen Antriebssystemen ist der schadstofffreie Vortrieb, bei dem lediglich harmloser Wasserdampf entsteht. Hierdurch können diese Fahrzeuge die Umwelt lokal entlasten und so einen Beitrag zur sauberen Mobilität vor Ort leisten.

### 2.2.3 Vergleich der Antriebssysteme

Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren verbrauchen nicht nur unwiederbringlich fossile Energie, sondern sie geben auch erhebliche Mengen an Schadstoffen an die Umwelt ab. Bei der idealen vollständigen Verbrennung von Benzin oder Diesel fallen als Produkte Kohlenstoffdioxid ( $\text{CO}_2$ ) und Wasser ( $\text{H}_2\text{O}$ ) an. Da in der Realität die Kraftstoffe immer nur unvollständig verbrannt werden können, entsteht hierbei eine Reihe weiterer Schadstoffe. Neben Kohlenstoff (C), der als Grundlage für Ruß und Feinstaub gilt, werden auch die für den Menschen schädlichen Substanzen Kohlenstoffmonoxid (CO) und Stickstoffoxide ( $\text{NO}_x$ ) gebildet<sup>11</sup>. Bei der Nutzung von fossilen Energieträgern in Verbrennungsmotoren entsteht in hohem Ausmaß Kohlenstoffdioxid. Verbrennt man rund 1 kg Benzin oder Diesel, so wird dabei die beachtliche Menge von etwa 3,2 kg  $\text{CO}_2$  an die Umwelt abgegeben<sup>12</sup>. Kohlenstoffdioxid beeinflusst nachweislich das Klima der Erde und zählt zu den

<sup>11</sup> Vgl. Geitmann, S.: Wasserstoff & Brennstoffzellen. S. 30-37.

<sup>12</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 6.

Treibhausgasen. Diese bewirken, dass das über die Erdatmosphäre einfallende Sonnenlicht nur zum Teil zurückgestrahlt werden kann. Wird in diesem Zusammenhang der Treibhaus-Effekt und damit einhergehend die globale Erderwärmung erwähnt, so lässt sich diese Gegebenheit auf die Treibhausgase zurückführen.

Um ein Antriebssystem hinsichtlich seiner Effizienz und Emissionen zu bewerten, ist die lokale Betrachtung des Fahrzeugs nicht ausreichend. Es bedarf der Berücksichtigung der gesamten Prozesskette von der Umwandlung über die Verteilung bis hin zur Nutzung des Energieträgers. Im Folgenden werden diese Aspekte anhand der konventionellen Antriebsarten und des Konzeptes mit einer Brennstoffzelle aufgezeigt. Der Hybridantrieb weist bezüglich des gesamten Bilanzraums nur minimale Unterschiede zu den Verbrennungsmotoren auf und wird aus Gründen der Übersichtlichkeit anschließend nicht mehr separat aufgeführt.

Betrachtet man die untenstehende Abbildung, so ist der im Vergleich zu brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen höhere Energiebedarf von Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren deutlich zu erkennen. Die Ursache hierfür liegt in dem geringen Wirkungsgrad, der etwa 20% bei benzinbetriebenen und knapp 25% bei dieselbetriebenen Fahrzeugen beträgt.

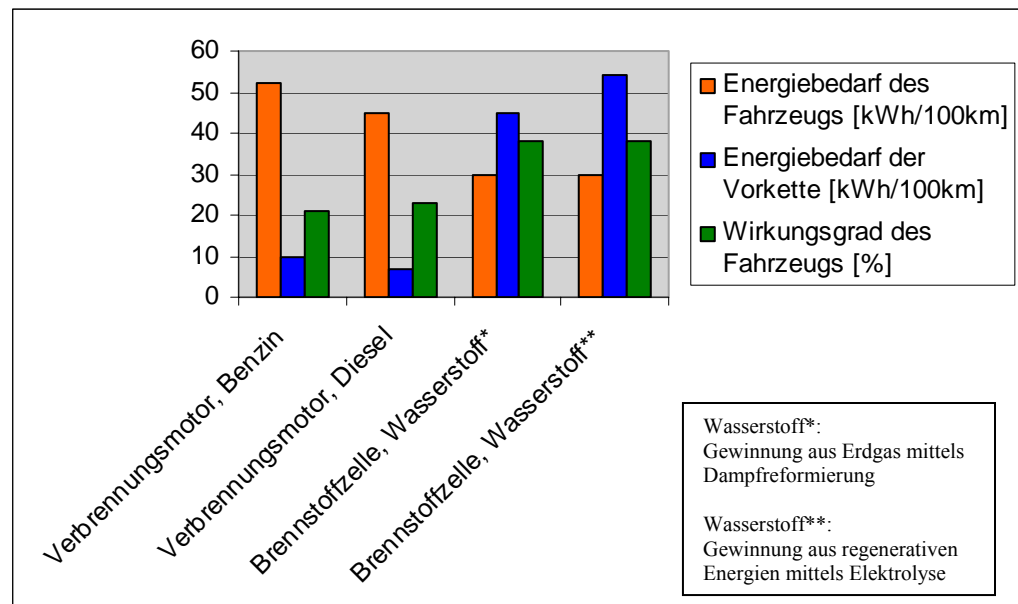


Abb. 2.3: Vergleich der Antriebssysteme<sup>13</sup>

Der Wirkungsgrad von Fahrzeugen mit Brennstoffzellen kann mit knapp 40% angegeben werden und ist demnach nahezu doppelt so groß wie bei Fahrzeugen mit

<sup>13</sup> in Anlehnung an Naunin, D.: Elektrofahrzeuge. S. 182-192.



Verbrennungsmotoren. Bei der Analyse der Vorkette fällt besonders der hohe Aufwand zur Bereitstellung von Wasserstoff auf, während Benzin und Diesel energetisch wesentlich günstiger gehandhabt werden können. Auffällig ist auch die Tatsache, dass für die Gewinnung von Wasserstoff auf regenerativer Basis mehr Energie erforderlich ist als bei der Gewinnung aus Erdgas. Betrachtet man nun nicht nur den lokalen Verbrauch der Fahrzeuge, sondern die gesamte Prozesskette, ergibt sich für ein brennstoffzellenbetriebenes Fahrzeug mit etwa 80 kWh/100 km ein um 25% höherer Energiebedarf als für Fahrzeuge mit Verbrennungsmotoren mit rund 60 kWh/100 km. Fakt ist also, dass ein Brennstoffzellen-Fahrzeug zwar lokal effizient und schadstofffrei betrieben werden kann, sich aber bei der Berücksichtigung des gesamten Bilanzraums hinsichtlich Energiebedarf und auch CO<sub>2</sub>-Emissionen keine Vorteile gegenüber Fahrzeugen mit konventionellen Antrieben ergeben. Weiterhin lässt sich ableiten, dass für einen nachhaltigen Verkehrssektor im Sinne von vollständiger Emissionsfreiheit über die gesamte Prozesskette die alleinige Verwendung von regenerativen Energien zur H<sub>2</sub>-Erzeugung nötig ist. Fakt ist allerdings auch, dass die Bereitstellung von Wasserstoff in der Gegenwart nahezu ausschließlich auf fossiler Basis beruht und sich entsprechend den aufgezeigten Erkenntnissen derzeit kein direkter Vorteil von brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren ergibt.

### 2.3 Historische Eckpunkte

Um die Entwicklung der Brennstoffzellentechnik anschaulich nachvollziehen zu können, wird in diesem Abschnitt kurz auf zentrale geschichtliche Ereignisse<sup>14</sup> eingegangen.

Die Entdeckung des Wasserstoffs im Jahr 1766 geht auf den britischen Naturwissenschaftler Henry Cavendish zurück. Ferner erkannte er bei seinen Experimenten, dass bei der Verbrennung von Wasserstoff als Reaktionsprodukt Wasser entstand. Den ersten Meilenstein für die Brennstoffzelle stellt die im Jahr 1780 von dem italienischen Physiker Luigi Galvani entdeckte Theorie zur Umwandlung von chemischer in elektrische Energie dar, die von ihm aber noch nicht in die Praxis umgesetzt werden konnte. Als wichtigste Erkenntnis zum Funktionsprinzip der Brennstoffzelle gilt die Entdeckung des Polarisierungseffektes im Jahr 1838, bei der der deutsch-schweizerische Chemiker Christian Friedrich Schönbein in seinen elektrochemischen Versuchen mit Wasserstoff und Sauerstoff eine Spannungsdifferenz

---

<sup>14</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 15-25.





feststellen und auf diesem Weg Elektrizität erzeugen konnte. Inspiriert durch die Aussagen von seinem Freund Schönbein erkannte der britische Physiker Sir William Grove das Potential zur elektrochemischen Stromerzeugung. Im Jahr 1839 entwickelt er einen eigenen Aufbau mit in Reihe geschalteten Zellen, der galvanischen Gasbatterie, bei der unter Zufuhr von Wasserstoff und Sauerstoff elektrischer Strom gemessen werden konnte. Durch diese von Grove entwickelte Anordnung zur Stromerzeugung gilt er als Erfinder der Brennstoffzelle. Für diese Entdeckung gab es damals aufgrund der hohen Komplexität keine direkte Verwendung. Ferner bewirkten die Erfindungen des Verbrennungsmotors und des elektrodynamischen Prinzips der Stromerzeugung, dass die Brennstoffzelle weiter aus dem Blickfeld geriet. Etliche Jahrzehnte später, 1959, wurde die erste in der Praxis nutzbare Brennstoffzelle von dem amerikanischen Physiker Francis T. Bacon vorgestellt. Durch die Anwendung in der Raumfahrt geriet die Brennstoffzellentechnik auch in anderen Branchen, vor allem in dem Verkehrssektor, wieder mehr in den Fokus. So präsentierte General Motors im Jahr 1967 das erste brennstoffzellenbetriebene Fahrzeug, den GM Electrovan. Die Ölkrise in den Siebzigerjahren rief zahlreiche Überlegungen bezüglich alternativer Energiequellen und alternativer Antriebe hervor, die zur Folge hatten, dass seit dieser Zeit eine steigende Anzahl an Projekten zur Förderung des Brennstoffzelleneinsatzes verzeichnet werden konnte. Bis heute gibt es viele Entwicklungsprogramme von Ländern und Unternehmen mit dem Ziel, die Brennstoffzellentechnologie in die Versorgung von Gebäuden sowie in die Schifffahrt-, die Luftfahrt- und die Fahrzeugtechnik zu integrieren. Der große Durchbruch dieser Technologie im Sinne einer flächendeckenden Verwendung ist bis heute allerdings nicht erfolgt.

## 2.4 Theoretische Grundlagen der Brennstoffzelle

### 2.4.1 Definitionen chemischer Grundbegriffe

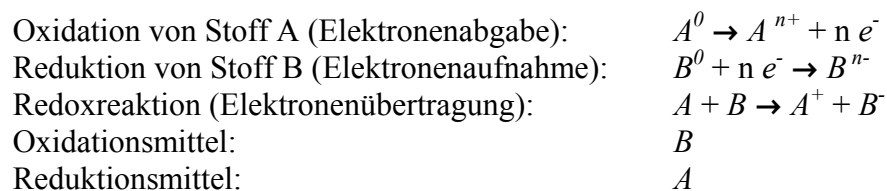
Atome setzen sich aus einer Atomhülle und einem Atomkern zusammen. Die Atomhülle besteht aus negativ geladenen Elektronen (Formelzeichen  $e^-$ ), der Atomkern aus positiv geladenen Protonen und ungeladenen Neutronen. Bei ungeladenen Atomen ist die Anzahl an Elektronen gleich der Anzahl an Protonen. Folglich gilt für ein elektrisch neutrales Atom von einem Stoff  $A$  die Schreibweise  $A = A^0$ , wobei die Ladungszahl hier den Wert 0 annimmt. Befinden sich Atome durch einen Überschuss oder Mangel an Elektronen nicht im neutralen Zustand (geladene Atome), werden diese als Ionen bezeichnet. Positiv geladene Ionen werden





in der Chemie als Kationen, negativ geladene Ionen als Anionen charakterisiert. Ein Kation von einem Stoff  $B$  nimmt die Form  $B^{n+}$  an, während ein Anion eines Stoffes  $C$  durch das Formelzeichen  $C^{n-}$  dargestellt wird. Die Ladungszahl gibt die Wertigkeit der elektrischen Ladung des Ions an und wird dabei durch das Kürzel  $n$  repräsentiert.

Die in Brennstoffzellen ablaufenden chemischen Reaktionen sind so genannte Redoxreaktionen, bei denen von einem Stoff  $A$  auf einen anderen Stoff  $B$  die Elektronen übertragen werden. Durch die Bewegung dieser kurzzeitig freiwerdenden Ladungsträger entsteht elektrischer Strom, der zur Versorgung eines Verbrauchers genutzt werden kann. Während der Redoxreaktionen erfolgt gleichzeitig die chemische Oxidation des Stoffes  $A$  und die chemische Reduktion des Stoffes  $B$ . Die Oxidation entspricht einer Elektronenabgabe, wobei von dem Stoff  $A$  Elektronen abgespalten werden (kurz: Stoff  $A$  wird oxidiert). Bei der Reduktion läuft eine Elektronenaufnahme ab, bei der von dem Stoff  $B$  die Elektronen absorbiert werden (kurz: Stoff  $B$  wird reduziert). Stoffe, die ihre Elektronen abgeben, werden Reduktionsmittel genannt. Elektronenaufnehmende Stoffe werden als Oxidationsmittel bezeichnet. Die aufgezeigten Zusammenhänge zur Beschreibung einer allgemeinen Redoxreaktion lassen sich in folgender Darstellung besser erfassen:



#### 2.4.2 Aufbau und Funktion einer Brennstoffzelle

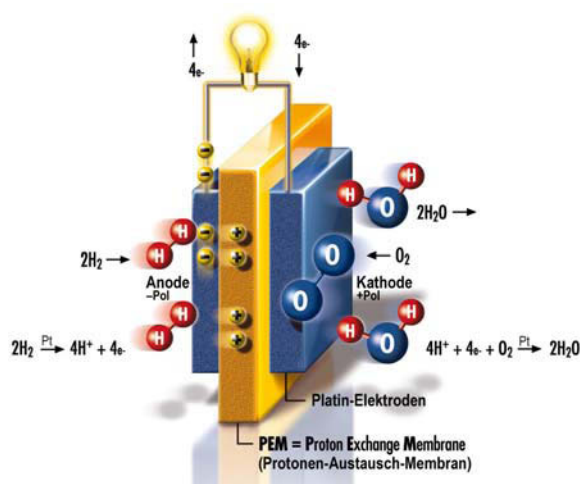
Brennstoffzellen sind elektrochemische Elemente, die die chemische Energie eines kontinuierlich zugeführten Brennstoffs (Wasserstoff) unter kontinuierlicher Zufuhr eines Reaktionspartners (Sauerstoff) in elektrische Energie und in Wärmeenergie umwandeln. Da die Wärmeenergie nur in seltenen Fällen genutzt werden kann, wird diese häufig auch als Verlustenergie angesehen und folglich in Berechnungen von Kenngrößen, wie beispielsweise dem Wirkungsgrad, vernachlässigt.

Die Hauptkomponenten einer Brennstoffzelle bilden zwei Elektroden und eine Elektrolytmembran<sup>15</sup>. Die Elektroden bestehen in der Regel aus Metallen und dienen als Leiter für die Elektronen. Sie sind mit einer Katalysatorschicht aus Platin überzogen, die den Ablauf der chemischen Reaktion beschleunigt. Bei elektrochemischen Zellen fungiert eine

<sup>15</sup> Vgl. Geitmann, S.: Wasserstoff & Brennstoffzellen. S. 134.

Elektrode als Anode (Minus-Pol), die andere Elektrode als Kathode (Plus-Pol). Da der Umgebung der Anode das eine Gas als Brennstoff und der Umgebung der Kathode das andere Gas als Reaktionspartner zugeführt wird, ist in der Praxis meist die Bezeichnung von zwei Gasräumen üblich. Diese werden durch eine Elektrolytmembran, eine etwa 0,1 mm dicke Kunststoffolie, gasdicht voneinander getrennt, um die sofortige Reaktion beider Gase zu verhindern. Protonen können sich durch die Membran bewegen, Elektronen aber nicht. Diese sollen schließlich über die Anode an den Verbraucher geleitet und erst danach an die Kathode weitergegeben werden.

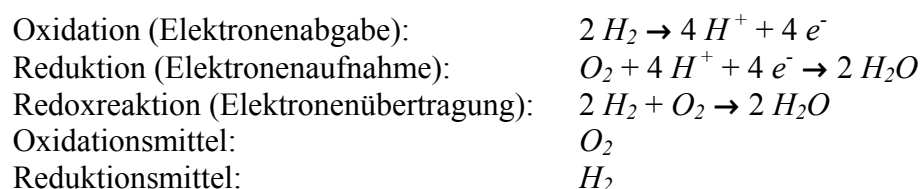
Der Anode wird der Wasserstoff zugeführt, der Kathode der Sauerstoff. Durch den Einsatz des Katalysators Platin erfolgt eine Aufspaltung des Wasserstoffs in  $H^+$ -Ionen (Protonen) und Elektronen. Die Protonen wandern durch die Membran zur Kathode, wodurch zwischen beiden Elektroden eine Spannungsdifferenz entsteht. Infolgedessen werden die



negativ geladenen Elektronen als elektrischer Strom über einen äußeren Stromkreislauf mit einem Verbraucher von der Anode zur Kathode bewegt. Hier rekombinieren die Protonen, die Elektronen aus dem Stromkreislauf und die Sauerstoff-Ionen, wobei unter Entstehung von Wärme Wasser als einziges Reaktionsprodukt anfällt.

Abb. 2.4: Die Brennstoffzelle<sup>16</sup>

Die Redoxreaktion in der Brennstoffzelle kann gemäß dem oben genannten Schema folgend beschrieben werden:



Brennstoffzellen dieses Typs erreichen in der Praxis Spannungen von ca. 0,7 V und auf die Membranfläche bezogene Stromdichten von ca.  $0,6 \frac{A}{cm^2}$ <sup>17</sup>.

<sup>16</sup> Homepage der Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH: [www.h-tec.com](http://www.h-tec.com).

<sup>17</sup> Vgl. von Unwerth, Thomas: Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme (Skript des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik der Universität Hannover). Abschnitt 2.2, Seite 19.

### 2.4.3 Aufbau und Funktion eines Brennstoffzellen-Stacks

Bedingt durch die niedrigen Spannungswerte lassen sich mit einer einzelnen Brennstoffzelle nur relativ geringe Leistungsabgaben erzielen. Zur Versorgung größerer elektrischer Verbraucher werden mehrere Zellen in Reihe geschaltet, sodass größere Spannungen und folglich auch größere Leistungen (Leistung = Spannung  $\times$  Stromstärke) realisierbar sind. Solch eine Reihenschaltung kann in technischen Systemen aus mehreren hundert einzelnen Brennstoffzellen zusammengesetzt sein und wird als Brennstoffzellen-Stack oder auch Brennstoffzellen-Stapel bezeichnet. Stacks enthalten neben mehreren Brennstoffzellen Bipolar-Platten als weitere elementare Bauteile<sup>18</sup>. Diese übernehmen die elektrische Trennung der einzelnen Zellen voneinander und versorgen über eingearbeitete Strömungsstrukturen die Zellenflächen mit Wasserstoff und (Luft-) Sauerstoff.

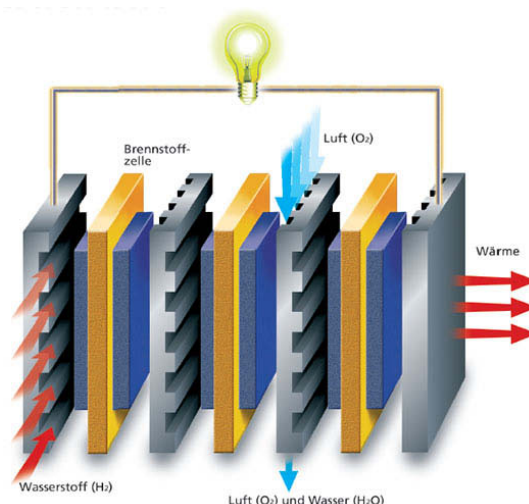


Abb. 2.5: Der Brennstoffzellen-Stack<sup>19</sup>

Für einen Brennstoffzellen-Stack gelten folgende zentrale Aussagen<sup>20</sup>:

Die Anzahl der Brennstoffzellen bestimmt die Spannung.

Die Größe der Membranfläche der Brennstoffzellen bestimmt die Stromstärke.

<sup>18</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 147.

<sup>19</sup> Homepage der Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH: [www.h-tec.com](http://www.h-tec.com).

<sup>20</sup> Vgl. Geitmann, S.: Wasserstoff & Brennstoffzellen. S. 138.

## 2.5 Wasserstoff als Energieträger für die Brennstoffzelle

### 2.5.1 Eigenschaften von Wasserstoff

Wasserstoff ist unter Standardbedingungen ein geruchloses, farbloses, ungiftiges und entzündliches Gas, das aufgrund seiner hohen Reaktivität mit anderen Atomen nie als einzelnes Wasserstoffatom  $H$  existiert. Sehr schnell erfolgt die Reaktion mit einem weiteren Wasserstoffatom zu einem Wasserstoffmolekül  $H_2$ , das in der Natur praktisch nicht vorzufinden ist. Auf der Erde kommt Wasserstoff meist in Verbindung mit Sauerstoff in Form von Wasser  $H_2O$  vor. Aus dieser Eigenschaft resultiert auch die Bezeichnung von Wasserstoff mit dem Synonym *Hydrogen*, welches übersetzt *Wasserbildner* bedeutet<sup>21</sup>. Chemisch gesehen besteht Wasserstoff aus einem Proton und einem Elektron und ist das kleinste und leichteste vorkommende Element. Die Schmelztemperatur beträgt  $-259\text{ °C}$ , während der Übergang an der Phasengrenze von flüssig und gasförmig bei einer Siedetemperatur von  $-253\text{ °C}$  erfolgt. Das Wasserstoffmolekül weist eine hohe Bindungsenergie auf, wodurch sich dieses unter Standardbedingungen sehr reaktionsträge verhält und für den Ablauf einer chemischen Reaktion höhere Temperaturen oder Katalysatoren als Reaktionsbeschleuniger benötigt werden<sup>22</sup>. Nachteilig in der Praxis sind die sehr leichte Flüchtigkeit und die Versprödung, die zu Rissen in metallischen Bauteilen führen kann. Ferner stellt die geringe volumetrische Energiedichte eine große Herausforderung dar. Wasserstoff als kohlenstofffreier Energieträger gilt häufig als umweltfreundlicher Kraftstoff der Zukunft. Bei der Reaktion mit Sauerstoff entstehen keine Schadstoffe und es werden große Mengen an Energie frei, die in technischen Anwendungen genutzt werden können. Die allgemein bei einer Verbrennung freiwerdende Energie wird über den Heizwert  $H$  ausgedrückt, der bei Wasserstoff unter Standardbedingungen  $H_{H_2} = 10,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 3,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$  beträgt.

### 2.5.2 Erzeugung von Wasserstoff

Bei der Gewinnung von Wasserstoff werden allgemein fünf Verfahrenswege unterschieden<sup>23</sup>. In vielen chemischen Prozessen entsteht Wasserstoff als Nebenprodukt (1). Als beispielhafter Prozess kann hier die Benzinreformierung in Rohölraffinerien genannt werden. Die gezielte

---

<sup>21</sup> Vgl. Geitmann, S.: Wasserstoff & Brennstoffzellen. S. 53.

<sup>22</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 36.

<sup>23</sup> Vgl. Ebd. S. 49-78.

Erzeugung erfolgt größtenteils durch Reformierung (2), bei der unter Freisetzung großer Mengen an Kohlenstoffdioxid der Wasserstoff aus fossilen Kohlenwasserstoffen, in der Regel Erdgas, hergestellt wird. Bei der direkten Spaltung (3), auch als Cracken bekannt, wird Wasserstoff aus fossilen Energien gewonnen, allerdings ohne die Emission von CO<sub>2</sub>. Nachteilig sind bei diesem Prozess der hohe erforderliche Energieaufwand und die vergleichsweise geringe Menge an erzeugtem Wasserstoff. Als weiterer Verfahrensweg kann die Vergasung (4) angegeben werden, bei der fossile Kohlenwasserstoffe, meist Kohle, zum Einsatz kommen. Im Fokus von Forschungen befindet sich die Vergasung von Biomasse wie Holz oder Torf. Eine weitere Möglichkeit der Wasserstofferzeugung ist die elektrochemische Spaltung von Wasser (5), auf die im folgenden Abschnitt aufgrund der großen Relevanz für die später thematisierte Versuchsreihe etwas näher eingegangen werden soll.

Die Spaltung eines Stoffes durch Stromzufuhr wird allgemein als Elektrolyse definiert. Diese erfolgt bei der Verwendung des Ausgangsstoffs Wasser in einem Elektrolyseur, der dem Aufbau einer Brennstoffzelle sehr ähnlich ist. Die Elektrolyse entspricht dabei der Umkehrung der Prozesse in einer Brennstoffzelle:

	<b>Elektrolyseur</b>	<b>Brennstoffzelle</b>
<b>Edukte</b>	Wasser	Wasserstoff, Sauerstoff
<b>Produkte</b>	Wasserstoff, Sauerstoff	Wasser
<b>Redoxreaktion</b>	$2 \text{ H}_2\text{O} \rightarrow 2 \text{ H}_2 + \text{O}_2$	$2 \text{ H}_2 + \text{O}_2 \rightarrow 2 \text{ H}_2\text{O}$
<b>energetische Umwandlung</b>	elektrisch (Strom) → chemisch (Wasserstoff)	chemisch (Wasserstoff) → elektrisch (Strom)

Wasser als quasi unerschöpflicher Rohstoff wird unter Zufuhr von Gleichstrom in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff zerlegt. Hierbei erfolgt eine Umwandlung von elektrischer Energie in chemische Energie. Würde die elektrische Energie ausschließlich aus regenerativen Energiequellen, wie in Abbildung 2.6 durch eine Solarzelle repräsentiert, gewonnen werden, ließe sich auf dieser Basis eine nachhaltige emissionsfreie Energiewirtschaft realisieren.

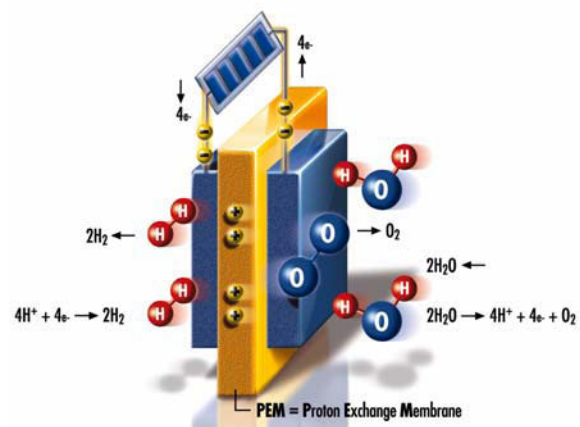


Abb. 2.6: Der Elektrolyseur<sup>24</sup>

<sup>24</sup> Homepage der Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH: [www.h-tec.com](http://www.h-tec.com).



### 2.5.3 Speicherung von Wasserstoff

Generell werden drei Varianten zur Wasserstoffspeicherung unterschieden<sup>25</sup>: die Druckgas-, die Flüssiggas- und die Metallhydridspeicherung.

Aufgrund der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff ist es erforderlich, das Volumen zu minimieren, um auf diesem Weg größere Mengen an Energie speichern zu können. Entsprechend den thermodynamischen Grundsätzen besteht die Möglichkeit, Wasserstoff zu komprimieren, indem hohe Drücke erzielt werden (gemäß  $p \cdot V = \text{konstant}$ ; Druck  $p$  und Volumen  $V$ ). Gängig sind für die Wasserstoffspeicherung Drücke bis 350 bar, wobei die Energiedichte dann 731 kWh pro Kubikmeter beträgt. In der Forschung werden Versuche mit bis zu 700 bar durchgeführt. Die durch die Druckgasspeicherung hervorgerufenen inneren Kräfte machen eine entsprechende Dimensionierung der Gasflaschen nötig, die zu großen Wandstärken und schließlich einem sehr hohen Leergewicht führt. Um diesen nachteiligen Aspekt der Druckgasspeicherung einzudämmen, können statt Stahlflaschen wesentlich leichtere Speicher aus Verbundwerkstoffen eingesetzt werden. Um die Gefahr von steigendem Druck im Inneren durch äußere Temperatureinflüsse zu vermeiden, sind alle Behälter mit Sicherheitsventilen ausgestattet, um bei Bedarf Teile des Gases entweichen zu lassen und den Druckausgleich wiederherzustellen. Die Verdichtung des Wasserstoffs erfordert einen Energieaufwand von etwa 15% des Heizwerts<sup>26</sup>. Für gasförmigen Wasserstoff ist in der Praxis das Kürzel  $\text{GH}_2$  üblich (*gaseous hydrogen*).

Ein weiteres Verfahren zum Erreichen einer höheren volumetrischen Energiedichte ist die Flüssiggasspeicherung. Der Wasserstoff wird bis unter seinen Siedepunkt von  $-253\text{ °C}$  abgekühlt und liegt anschließend in flüssiger Form vor. Man spricht in dieser tiefkalten Form auch von kryogenem Wasserstoff. Um einen Übergang von der flüssigen zur gasförmigen Phase und damit steigende Drücke durch von außen einwirkende Wärmeströme eindämmen zu können, bedarf es eines hohen Isolationsgrads des Kryogen-Behälters. Damit einem eventuellen Druckanstieg vorgebeugt werden kann, verfügen auch die Flüssiggasspeicher über Sicherheitsventile. Zur Verflüssigung besteht ein Energiebedarf von etwa 30% des Heizwerts<sup>27</sup>. Liegt Wasserstoff in flüssiger Form vor, wird für diesen die Bezeichnung  $\text{LH}_2$  verwendet (*liquid hydrogen*).

---

<sup>25</sup> Vgl. Geitmann, S.: Wasserstoff & Brennstoffzellen. S. 83-98.

<sup>26</sup> Vgl. Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 91.

<sup>27</sup> Vgl. Ebd. S. 94.

Eine andere Speichervariante stellt die Verwendung von Metallhydriden dar. Hierbei wird der Wasserstoff in die Gitter von speziellen Metallen oder Metalllegierungen chemisch eingelagert. Dieser wird wieder zur Nutzung freigegeben, sobald dem Speicher Wärme zugeführt wird. Zentrale Vorteile sind der vergleichsweise geringe Raumbedarf und die hohe Energiespeicherfähigkeit. Nachteilig ist das durch die massive Bauweise bedingte enorm hohe Gewicht der Metallhydridspeicher.

Um nochmals die Problematik der geringen volumetrischen Energiedichte von Wasserstoff zu thematisieren, soll ein kurzer energetischer Vergleich mit dem derzeit in der Fahrzeugtechnik am meisten genutzten Kraftstoff Benzin erfolgen.

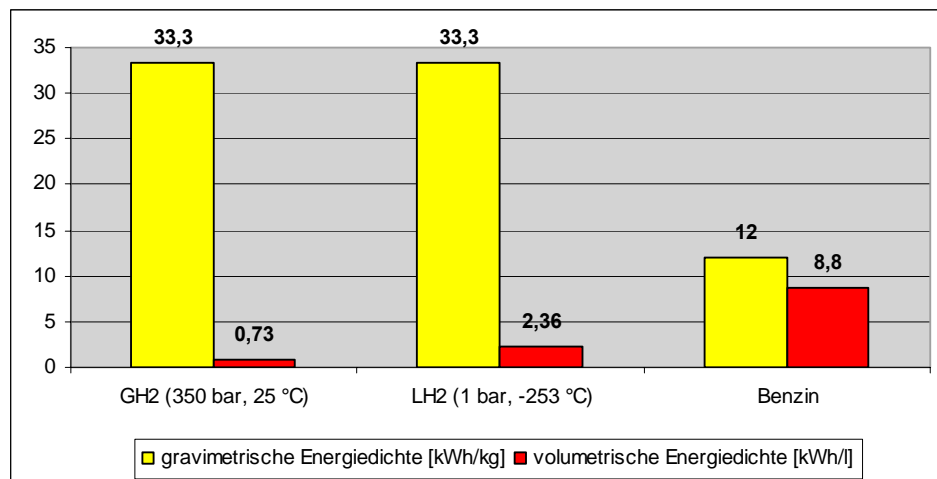


Abb. 2.7: Gravimetrische und volumetrische Energiedichten im Vergleich<sup>28</sup>

Wasserstoff weist mit 33,3 kWh/kg gegenüber Benzin mit 12 kWh/kg eine sehr hohe gravimetrische (massenspezifische) Energiedichte auf, unterliegt aber unter dem Gesichtspunkt der volumetrischen (volumenspezifischen) Energiedichte deutlich. Bezogen auf das Volumen von einem Liter hat Druckwasserstoff 0,73 kWh, Flüssigwasserstoff 2,36 kWh und Benzin 8,8 kWh an energetischem Gehalt. Benzin hat folglich eine rund 4- bis 12-fach höhere volumenspezifische Energiedichte als GH<sub>2</sub> oder LH<sub>2</sub>. Durch diesen Umstand stellt sich den Automobilherstellern die Herausforderung, brennstoffzellenbetriebene Fahrzeuge mit großen Wasserstoffspeichern mit möglichst hoher volumetrischer Energiedichte auszurüsten, damit sich diese hinsichtlich der Reichweite mit konventionell angetriebenen Fahrzeugen messen lassen können.

<sup>28</sup> in Anlehnung an Eichlseder, H.: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. S. 86-87.



#### 2.5.4 Die Vision der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft

Bei dem Konzept der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft wird auf regenerativer Basis aus Sonnenenergie, Windenergie und Wasserenergie Strom erzeugt, der dem Verbraucher zur Verfügung gestellt werden kann oder der sauberen Erzeugung von Wasserstoff aus Wasser mittels Elektrolyse dient. Da große Mengen an Energie in Form von elektrischem Strom nur begrenzt speicherbar sind, übernimmt der Wasserstoff die Aufgabe der energetischen Zwischenspeicherung. Besteht nun der Bedarf an elektrischer Energie, wird unter Verwendung der Brennstoffzelle der zuvor produzierte Wasserstoff zur Stromerzeugung genutzt. Stationäre Brennstoffzellen versorgen Haushalte, Industrieanlagen und andere Einrichtungen, während die mobilen Brennstoffzellen in der Fahrzeugtechnik die Speisung des Elektromotors übernehmen. Auf diesem Weg lässt sich eine durchgängige Stromversorgung von allen Verbrauchern sicherstellen.



Abb. 2.8: Wasserstoffwirtschaft<sup>29</sup>

#### 2.6 Vor- und Nachteile der Brennstoffzellentechnologie

Als Abschluss des Kapitels *Allgemeine Aspekte der Brennstoffzelle* sollen zur gesamtheitlichen Bewertung des Einsatzes von Brennstoffzellen kurz und knapp vor- und nachteilige Gesichtspunkte aufgezeigt werden.

Aus den vorhergehenden Teilkapiteln ist bereits deutlich geworden, dass die Brennstoffzelle reinen Wasserdampf und keine CO<sub>2</sub>-Emissionen oder andere Schadstoffe an die Umgebung abgibt und folglich einen Beitrag zu lokaler Umweltentlastung leisten kann. Zudem ist bereits bekannt, dass die chemische Energie des eingesetzten Energieträgers direkt in elektrische Energie umgewandelt wird (Turbinen beispielsweise benötigen hierfür drei

<sup>29</sup> Homepage der Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH: [www.h-tec.com](http://www.h-tec.com).





Energieumwandlungsprozesse). Folglich sind beim Einsatz von Brennstoffzellen nur bei einer Umwandlung energetische Verluste hinzunehmen, sodass hier im Vergleich zu konventionellen Stromerzeugungsanlagen deutlich höhere Wirkungsgrade erzielt werden können. Da im Brennstoffzellen-System außer Pumpen und Kompressoren keine beweglichen Komponenten arbeiten, ist eine geräusch- und vibrationsarme Nutzung gewährleistet<sup>30</sup>. Bei einem flächendeckenden Einsatz der Brennstoffzellentechnologie kann aus politisch-wirtschaftlicher Sicht die Reduktion der Abhängigkeit von erdölfördernden Ländern als weiterer Vorteil genannt werden.

Neben den positiven Aspekten existieren aber auch einige Problematiken. So ist vor allem die Handhabung des Wasserstoffs mit einigen Nachteilen behaftet. Die Erzeugung und Speicherung benötigt enorme Mengen an Energie, woraus eine vergleichsweise ungünstige energetische Gesamtbilanz resultiert. Bezüglich der H<sub>2</sub>-Speicherung stellt zudem die geringe volumenspezifische Energiedichte eine große technische Herausforderung dar. Die Herstellung von Brennstoffzellen ist momentan noch sehr kostenintensiv, wozu neben den geringen Produktionsmengen unter anderem auch die notwendigen Platinkatalysatoren zur Aufspaltung des Wasserstoffmoleküls beitragen. Ferner bedarf es weiterer Entwicklungsfortschritte hinsichtlich der Dauerhaltbarkeit und der Zuverlässigkeit, damit sich die Brennstoffzelle gegenüber anderen Energiewandlern durchsetzen kann.

Betrachtet man nun die Brennstoffzellentechnologie im Kontext der Fahrzeugtechnik, können zu den bisher allgemein gültigen Aussagen weitere Vor- und Nachteile ergänzt werden. Positive Aspekte durch den Einsatz des nachgeschalteten Elektromotors sind das aus dem Stillstand anliegende hohe Drehmoment und der große Nutzdrehzahlbereich, sodass nur ein oder wenige Gänge notwendig sind und gegebenenfalls auf ein Getriebe völlig verzichtet werden kann<sup>31</sup>. Gegenüber Fahrzeugen mit Verbrennungsmotoren haben mit Elektromotoren betriebene Fahrzeuge zusätzlich die positive Eigenschaft, dass sie im Betrieb im Stillstand keine Energie benötigen und über einen Generator die Brems- und Schubenergie zurückgewinnen können. Als nachteilig kann die geringe Reichweite, bedingt durch die problematische Wasserstoffspeicherung, aufgeführt werden. Häufig wird auch in dem verwendeten Energieträger Wasserstoff, speziell bei der Druckgasspeicherung, ein großes Sicherheitsrisiko gesehen. Versuche in der Praxis zeigen allerdings, dass diese Sorgen unbegründet sind.

---

<sup>30</sup> Vgl. Geitmann, S.: Wasserstoff & Brennstoffzellen. S. 164.

<sup>31</sup> Vgl. Kattentidt, B.: Entwicklung eines elektrischen Antriebssystems. S. 17.



## 2.7 Ausblick

Die Fokussierung der Fahrzeugtechnik bei der Beschreibung diverser Aspekte der Brennstoffzellentechnologie soll nicht den Eindruck erwecken, dass die Brennstoffzelle ausschließlich im Verkehrssektor von Relevanz sei. Auch im Bereich der Hausenergieversorgung kommt dieser Technologie eine stetig wachsende Bedeutung zu. Die Brennstoffzelle eignet sich hervorragend zur Versorgung privater Haushalte und öffentlicher Einrichtungen, da im Betrieb neben elektrischer Energie auch Energie in Form von Wärme abgegeben wird, die zum Aufheizen des Gebäudeinneren genutzt werden kann. Durch die intensive Auseinandersetzung mit der Brennstoffzelle im Automobilbereich soll aber verdeutlicht werden, dass aufgrund der rückläufigen Erdölressourcen besonders der Verkehrssektor dem Druck unterliegt, neue Antriebskonzepte mit einem neuen Energieträger zu entwickeln und zu erproben.

Damit die Brennstoffzelle der Rolle des zukünftigen stationären und mobilen Energiewandlers gerecht werden kann, bedarf es neben dem Erreichen einer wirtschaftlicheren Produktion und einer höheren Zuverlässigkeit vor allem einer gut ausgebauten Wasserstoffinfrastruktur. Da die derzeitige H<sub>2</sub>-Erzeugung aus fossilen Energien aus emissionstechnischer Sicht nicht zu befürworten ist, muss im Sinne einer nachhaltigen Energiewirtschaft der Wasserstoff ausschließlich mittels Elektrolyse auf erneuerbarer Basis erzeugt werden. Ein Umbau der Energiesysteme, bei dem eine Orientierung weg von fossilen hin zu regenerativen Energienquellen wie Sonnen-, Wind- oder Wasserenergie erfolgt, ist demnach eine wichtige Voraussetzung. Da dieser Umbau im Energiesektor bis heute nicht in ausreichendem Maße erfolgt ist, konnte sich die Brennstoffzellentechnologie weniger rasant entwickeln, als noch vor einigen Jahren prophezeit wurde.

Fazit: Um die Brennstoffzellentechnologie effizient und erfolgreich in die stationäre und mobile Energieversorgung implementieren zu können, bedarf es neben einer flächendeckenden Wasserstoffinfrastruktur der Wasserstoffgewinnung mittels Elektrolyse auf Basis von Sonnen-, Wind-, und Wasserenergie.



### **3. Theorie der didaktischen Konzeption**

#### **3.1 Einleitende Worte**

Bedingt durch den fortschreitenden Ausbau der Internettechnologie gegen Ende der 1990er Jahre geriet der Computer als Lernmedium zunehmend in den Fokus der Aus- und Weiterbildung. Dem aufkommenden Begriff des E-Learning im Sinne von elektronisch unterstütztem Lernen sprach man teilweise sogar das Potential zu, den klassischen Unterricht völlig ersetzen zu können. Standen damals noch die technischen Möglichkeiten des Lernens mit dem Computer und dem Internet im Vordergrund, konzentriert man sich heute zur Lernerfolgssicherung immer mehr auf die Didaktik des E-Learning<sup>32</sup>. Das am Computer in der Regel isoliert erfolgende Lernen bedarf neben Selbstständigkeit und Selbstverantwortung besonders einem hohen Grad an Selbstmotivation des Lernenden. Da auf diese Faktoren nicht immer zurückgegriffen werden kann, entwickelt sich die Tendenz zu einer neuen didaktischen Konzeption des E-Learning, dem Blended Learning.

#### **3.2 Definition des Blended Learning**

Blended Learning bezeichnet ein Lehr-/Lernkonzept, bei dem E-Learning-Elemente in didaktisch sinnvoller Weise mit Präsenzunterricht verknüpft werden (blended = englisch gemischt)<sup>33</sup>. Die Verzahnung dieser beiden Komponenten in einem Lehr-/Lernarrangement zielt darauf ab, die jeweiligen Vorteile miteinander zu kombinieren und dadurch die jeweiligen Nachteile zu eliminieren. Dieses auch als hybrides Arrangement bekannte Konzept bietet dem Schüler ein durchgängig betreutes Lernen, wobei das selbstständige und individuelle Lernen im Vordergrund steht. Die Lehrkraft übernimmt hier mehr die Rolle eines Motivators und Betreuers und seltener die eines Vermittlers von Lerninhalten, sodass während des Unterrichts flexibler agiert werden kann und folglich die Möglichkeit besteht, leistungsschwächere Schüler gezielt unterstützen zu können. Ferner gehört zu ihrer Aufgabe,

---

<sup>32</sup> Vgl. Marx, Johannes: Motivationale Aspekte beim E-Learning. Theoretische Ansätze und Hinweise für die Praxis zur Motivation für das Lernen mit dem Computer und im Internet. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller 2007. S. 5.

<sup>33</sup> Vgl. Obrist, Markus: Methoden des Blended Learning. Überblick und Softwareevaluation. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller 2007. S. 7.



bei der Unterrichtsvorbereitung unter didaktischen Gesichtspunkten die Dauer der Präsenz- und E-Learning-Phasen zu bestimmen und Kontrollen zur Lernerfolgssicherung in den Unterricht zu integrieren. Ein weiteres zentrales Merkmal ist die ausgeprägte Interaktion und Kommunikation zwischen allen Beteiligten. Abschließend zur Begriffsbestimmung können zusätzlich zu E-Learning-Phasen weitere Bestandteile hybrider Lehr-/Lernarrangements<sup>34</sup> formuliert werden:

- Präsenzphasen
- Selbstlernaktivität
- Kooperatives Lernen
- Soziale Lernprozesse
- Individuelle Betreuung
- Lernberatung
- Lernerfolgskontrolle

In den sich anschließenden Teilkapiteln wird der Begriff des E-Learning als zentraler Bestandteil eines Blended-Learning-Arrangements umfassend aus verschiedenen Perspektiven beleuchtet, wobei den didaktischen Aspekten besondere Aufmerksamkeit zukommen soll.

### **3.3 Vorraussetzungen für den Einsatz von E-Learning an Schulen**

Es ergeben sich drei Anforderungsfelder, die für einen erfolgreichen Unterricht mittels E-Learning zu erfüllen sind<sup>35</sup>. Aus technischer Sicht sind Klassenräume bereitzustellen, die mit einer ausreichenden Anzahl an internetfähigen Computern mit einwandfrei funktionierender Hardware und Software ausgestattet sind. Neben der Fachkompetenz und der Akzeptanz von E-Learning als Lernmethode wird von der Lehrkraft eine hohe Medienkompetenz erwartet, die zur Gestaltung von E-Learning-Software nötig ist. Die Schüler müssen über ausreichende Kenntnisse zur Bedienung des Computers verfügen und diesen auch als Lernmedium akzeptieren. Zudem sind Selbstlernkompetenz und Lesekompetenz nötig, um einen effektiven Lernprozess gewährleisten zu können.

---

<sup>34</sup> Vgl. Dreer, Silvia: E-Learning an berufsbildenden Schulen. Möglichkeiten zur Förderung des selbstgesteuerten Lernens. Boizenburg: Verlag Werner Hülsbusch 2008. S. 116.

<sup>35</sup> Vgl. Ebd. S. 112.



### 3.4 Lehr-/Lernmethoden im E-Learning

Die große Vielfalt der E-Learning-Methoden lässt sich in vier übergeordnete Methodengruppen differenzieren<sup>36</sup>: Online Teaching, Online Assignments, Online Discussions und Online Tutorials. Einzelne Lernmethoden müssen in der Praxis nicht zwangsläufig separat voneinander umgesetzt werden und lassen sich unter Berücksichtigung didaktischer Aspekte miteinander kombinieren.

Online Teaching bezeichnet lehrerzentrierte Methoden, bei denen Lehrende mittels E-Learning Lerninhalte vermitteln. Dies erfolgt in der Regel in Form von aktivem Auftreten der Lehrkraft, oder aber auch durch die Darbietung von zuvor gespeicherten Multimediateilen. Als charakteristische Beispiele sind Online Lectures und Online Symposiums zu nennen. Während bei Lectures eine Lehrkraft die Inhaltsvermittlung übernimmt, wird in einem Symposium den Schülern der Inhalt von mehreren Lehrenden näher gebracht. Eine etwas andere Möglichkeit des Online Teaching ist der Sokratische Dialog, der die Erkenntnisgewinnung für einen Lerngegenstand anstrebt. In dieser forschend-entwickelnden Methode formuliert die Lehrkraft eine Problematik, für die von den Schülern Lösungswege zu erarbeiten sind. Online Teaching wird angewendet, wenn den Lernenden in relativ kurzer Zeit bestimmte Informationen zu übermitteln sind. Besondere Eignung ergibt sich für die Einführung in neue Sachverhalte.

Im Fokus der Online Assignments befinden sich die Lernenden, deren Aufgabe es ist, komplexe und umfangreiche Sachverhalte zu lösen. Die Lehrkraft bietet hierfür didaktisch aufbereitete elektronische Lernmaterialien dar und steht während der Bearbeitungszeit beratend zur Verfügung. Ferner kann die Lehrkraft auch zu einer gezielten Beschaffung von Informationen aus dem Internet anregen. Um den Lernfortschritt bei Online Assignments sicherstellen zu können, lassen sich Online Assessments als Lernkontrollen implementieren.

Bei den Methoden der Online Discussions stehen die Lernenden im Vordergrund. Sie werden in verschiedene Arbeitsgruppen unterteilt. Bei der Bearbeitung von vorgegebenen Aufgaben oder simulierten Projekten unterstützen sich die Teams gegenseitig durch den Austausch von Informationen, wodurch sich diese Lernmethode besonders zur Förderung der kommunikativen und kooperativen Kompetenz eignet. Die Lehrkraft koordiniert die Teamarbeit, fungiert als Betreuer der einzelnen Gruppen und greift erst bei größeren Problemen direkt in den Lernprozess ein.

---

<sup>36</sup> Vgl. Obrist, M.: Methoden des Blended-Learning. S. 10-23.



Online Tutorials werden in geführte und flexible Tutorials unterschieden. Die geführte Variante ist lehrerzentriert ausgerichtet und gibt üblicherweise einen festen Ablauf in der Lernsoftware vor. Typisch hierfür sind die sogenannten Drill&Practise-Anwendungen, bei denen Lerninhalte durch ständiges Wiederholen gefestigt werden sollen. In flexiblen Tutorials sind die Schüler nicht an einen vorgegeben Ablauf gebunden und können sich durch die Nutzung der Software den Lerninhalt variabel aneignen. Der Lernprozess erfolgt, indem Aufgaben in zur Verfügung gestellten Simulationen oder Planspielen bearbeitet werden.

### **3.5 Kategorisierung von E-Learning-Software**

Zum Begriff des E-Learning wird auf dem Markt verschiedenartige Software angeboten, die durch ihre Fülle kaum überblickt werden kann. Zur besseren Übersichtlichkeit lassen sich Software-Angebote nach Lernsystem oder Lernplattform unterteilen<sup>37</sup>. Aus didaktischer Sichtweise kann eine Kategorisierung auf Basis der verwendeten Lerntheorie erfolgen<sup>38</sup>.

Bei Lernsystemen lässt sich zwischen Expertensystemen und Autorensystemen unterscheiden. Unter Expertensystemen versteht man eine zu einem bestimmten Themenbereich bereits fertig gestellte Software, während bei der Verwendung von Autorensystemen die Software zunächst durch eine Lehrkraft erstellt werden muss.

Lernplattformen bieten den Lerninhalt eines speziellen Themengebiets an. Computer Based Training (kurz: CBT) als ein Plattfortmtyt kann als eigenständige Software beschrieben werden, die auf CD-ROM oder DVD gespeichert ist. Der Lernende hat die Möglichkeit, sich ortsunabhängig und eigenständig in selbst gewähltem Tempo Lerninhalte anzueignen. Die Verwendung eines Internetanschlusses wird bei CBT nicht miteinbezogen, wodurch die Möglichkeiten der Betreuung und Kommunikation stark eingeschränkt sind. Im Gegensatz dazu ist ein vorhandener Internetzugang für den zweiten Plattfortmtyt, das Web Based Training (kurz: WBT), eine wichtige Basis. Auf einem Server werden die Lerninhalte bereitgestellt, auf die von internetfähigen Computern aus zugegriffen werden kann. Der große Vorteil gegenüber dem Computer Based Training ist neben der Kommunikationsfähigkeit

---

<sup>37</sup> Vgl. Moriz, Werner: Blended-Learning. Entwicklung, Gestaltung, Betreuung und Evaluation von E-Learningunterstütztem Unterricht. Norderstedt: Books on Demand 2008. S. 17-19.

<sup>38</sup> Vgl. Meier, Rolf: Praxis E-Learning. Grundlagen, Didaktik, Rahmenanalyse, Medienauswahl, Qualifizierungskonzept, Betreuungskonzept, Einführungsstrategie, Erfolgssicherung. Offenbach: Gabal 2006. S. 81-85.



zwischen allen Beteiligten die einfache Verwaltung der Plattform, die eine schnelle Aktualisierung der alten Software durch neuere Versionen ermöglicht.

Jeder E-Learning-Software liegt eine bestimmte Vorstellung von einem Lernprozess zugrunde, die sich in eine der drei zentralen Lerntheorien, den Behaviorismus, den Kognitivismus und den Konstruktivismus, einordnen lässt.

Die Vernachlässigung der Denkprozesse im Behaviorismus führt zur Betrachtung des Lernenden als Black-Box. Es wird davon ausgegangen, dass ein bestimmter Reiz zu einem bestimmten Verhalten führt und das Lernen auf der Konsequenz der Handlung basiert. Der Lernprozess erfolgt demnach direkt durch Belohnung oder Bestrafung des Lernenden. Der Behaviorismus als Grundlage dient der Mehrheit der Lernsoftware, da diese durch simple Frage-Antwort-Gestaltung (z.B. Vokabellernen) geringen Programmieraufwand erfordert. Durch das kleinschrittige Vorgehen eignet sich der Behaviorismus als Lerntheorie nicht zum Aufbau von umfangreichen und zusammenhängenden Wissensstrukturen.

Im Kognitivismus wird der Lernende als Individuum gesehen, das neues Wissen selbstständig verarbeitet. Der Lernprozess beruht dabei auf der Bildung von kognitiven Strukturen, die durch die Verknüpfung von neuen Informationen mit dem Vorwissen des Lernenden entstehen. Da der Denkprozess in dieser Theorie im Vordergrund steht, kann als übergeordnetes Lernziel die Entwicklung des Verständnisses, anstatt von reinem Faktenwissen wie im Behaviorismus, formuliert werden. Hierfür ist in der Praxis durch die Software ein Nachschlagewerk bereitzustellen, um dem Lernenden mehrere Wege zur Erarbeitung von komplexen und umfassenden Lerninhalten zu ermöglichen. Die E-Learning-Software mit dem Kognitivismus als didaktisches Fundament hat ferner die Aufgabe, durch einen hohen Praxisbezug die Lernenden gezielt zu aktivieren und ihre Motivation während des gesamten Lernprozesses aufrechtzuerhalten.

Der Konstruktivismus betont den individuellen Aspekt des Lernens noch deutlich stärker als der Kognitivismus. Nach dieser Auffassung basiert der Lernprozess auf der selbstständigen Wissenskonstruktion durch den Lernenden. Lerninhalte können hier nicht vermittelt, sondern lediglich didaktisch aufbereitet werden. Zur Entwicklung von individuellem Wissen sind den Lernenden möglichst große Freiräume zu gewährleisten, damit sie selbst entscheiden können, wann und wie sie sich mit welchen Teil des Lerninhaltes auseinandersetzen wollen. Durch diese Gegebenheit ist der Konstruktivismus als Lerntheorie für die Erarbeitung großer komplexer Wissensstrukturen mittels Lernsoftware weniger geeignet.

### 3.6 Gestaltungsansätze des Blended Learning

Zu Beginn der Vorbereitung eines jeden Blended-Learning-Arrangements ist zwischen Gestaltungsformen zu wählen, die in der anschließenden Lernsequenz zum Tragen kommen sollen. Es wird hier zwischen einem explorativen, einem induktiven und einem deduktiv-heuristischen Ansatz differenziert.

	<b>Explorativ</b>	<b>Induktiv</b>	<b>Deduktiv-heuristisch</b>
<b>Zielgruppe</b>	kompetenter und informierter Lerner	Lerner mit fachlichem Hintergrund	Lerner mit guter Allgemeinbildung
<b>Vorgehensweise</b>	Der Lerner erhält ein Fallbeispiel und Zusatzinformationen, anhand derer er eigenständig Fragestellungen und mögliche Lösungssätze erarbeitet.	Der Lerner schließt mit Hilfe eines analytischen Rasters aus mehreren Fallbeispielen auf ein zugrunde liegendes Regelwerk.	Der Lerner erarbeitet auf der Basis eines analytischen Rasters, vorgegebener Regeln und einer heuristischen Fragestellung eine Lösung für einen definierten Fall.
<b>Zielsetzung</b>	Die Ergebnisse werden offen diskutiert, um gemeinsam ein heuristisches Muster und ein analytisches Muster zu erarbeiten.	Ergründung von allgemeinen Regeln und Strukturen.	Erarbeitung von Strategien zur Lösung eines Problems.
<b>Rolle des WBT</b>	Bereitstellung der notwendigen Informationen und Materialien.	Aufbereitung der Fallbeispiele und Vermittlung des analytischen Rahmens.	Vertiefung des heuristischen Musters auf der Basis des konkreten Falles und Vorgabe des analytischen Rasters und der Anwendungsregeln.

Abb. 3.1: Gestaltungsansätze für Blended Learning<sup>39</sup>

Selten treten die umschriebenen Gestaltungsformen isoliert voneinander auf. In der Praxis sind diverse Kombinationen dieser Ansätze üblich.

<sup>39</sup> Sauter, Annette; Sauter, Werner; Bender, Harald: Blended Learning. Effiziente Integration von E-Learning und Präsenztraining. München: Luchterhand 2004. S. 116.





### **3.7 Leitfragen einer E-Learning-Didaktik**

Aus der Komplexität elektronischer Lernmaterialien ergibt sich, dass für die Vorbereitung von E-Learning deutlich mehr Kriterien zu berücksichtigen sind, als bei Entwürfen von klassischen Unterrichtseinheiten. Zur Erfassung aller einen Lernprozess betreffenden Faktoren bedarf es der Berücksichtigung folgender Fragestellungen<sup>40</sup>:

1. Welche Lernziele werden durch die multimedialen Lehr-/Lernarrangements angestrebt?
2. Welche Inhalte werden in welcher Form angeordnet und mit Unterstützung welcher elektronischen Lernmedien vermittelt?
3. In welchem Lernkontext und in welchen Sozialformen soll das E-Learning stattfinden?
4. Welche Lehr-/Lernmethoden sollen den Lernprozess unterstützen?
5. Wie werden Lernaufgaben vorbereitet?
6. Welche Kommunikationsformen sollen wann und in welcher Weise verwendet werden?
7. Wie erfolgt die Lernerfolgssicherung?

Diese Leitfragen können von Lehrkräften zur Erstellung eigener Unterrichte mit E-Learning-Komponenten verwendet werden, lassen sich aber auch zur Überprüfung bereits erstellter mediendidaktischer Konzeptionen nutzen.

### **3.8 Konzeption von E-Learning-Software**

Dieses Teilkapitel thematisiert die Erstellung mediendidaktischer Konzeptionen. Zur besseren Übersichtlichkeit kann dieser umfangreiche Prozess in die folgenden Phasen unterteilt werden<sup>41</sup>:

1. Analyse vorliegender Materialien und Formulierung der Lernziele
2. Entwicklung eines spezifischen Modells
3. Entwicklung eines Betreuungsmodells

---

<sup>40</sup> Vgl. Tiemeyer, Ernst: E-Learning in der beruflichen Bildung. Technologien, Einsatzszenarien, E-Learning-Didaktik. Braunschweig: Winklers 2005. S. 44-45.

<sup>41</sup> Vgl. Moriz, W.: Blended-Learning. S. 54-60.



Zu vermittelnde Informationen aus Büchern eins-zu-eins in eine Lernplattform zu übertragen kann in keiner Weise zu einem erfolgreichen Lernprozess führen. Die Unterlagen sind, wie im klassischen Unterricht auch, zunächst mittels didaktischer Kriterien auf ihre Eignung hin zu überprüfen. Unter Beachtung der Zielgruppe und der kognitiven und individuellen Fähigkeiten der Lernenden sind Inhalte auszuwählen, aufzubereiten und zu ergänzen. In der didaktischen Analyse werden die Materialien hinsichtlich des didaktischen Gehalts überprüft. Hierbei erfolgt in einer didaktischen Reduktion die Vereinfachung von komplexen und abstrakten Sachverhalten hin zu fassbaren schülerspezifischen Aussagen. Bei dieser Prozedur sind die Ausgangsmaterialien sowohl einer vertikalen (Verringerung des Gültigkeitsumfangs) als auch einer horizontalen (Verringerung der Schwierigkeit durch konkrete Aussagen) Reduktion zu unterziehen. Einhergehend mit der didaktischen Aufbereitung der Inhalte werden Leit-, Richt-, Grob- und Feinziele formuliert.

Ein mediendidaktisches Konzept wird für bestimmte Schüler, bestimmte Lerninhalte und bestimmte Lernziele ausgearbeitet. Bei der Erstellung dieses spezifischen Modells ist unter dem Aspekt eines Blended-Learning-Arrangements darauf zu achten, durch die Kombination von Präsenz- und E-Learning-Phasen eine möglichst hohe Effizienz zu erreichen. Feste Regeln zur Anordnung der Phasen können nicht angegeben werden, da hierfür von der Lehrkraft zahlreiche Faktoren zu berücksichtigen sind. Es kann aber die Empfehlung ausgesprochen werden, die Einführung in komplexe Sachverhalte mittels Präsenzunterricht zu gestalten und erst anschließend in eine E-Learning-Phase überzugehen.

Wie bereits in vorigen Abschnitten erwähnt, kommt der Betreuung beim elektronischen Lernen eine große Bedeutung zu. Von der Lehrkraft ist ein Betreuungsmodell zu entwerfen, das arrangementspezifisch die Art der Unterstützung der Schüler in einer Lernsequenz beschreibt. Verwiesen sei an dieser Stelle auf die synchronen und asynchronen Informations- und Kommunikationstechnologien in Kapitel 3.11.

### **3.9 Gestaltung von E-Learning-Software**

Bei der computergestützten Darbietung von Lerninhalten sind einige Hinweise<sup>42</sup> zu beachten, durch die eine Überforderung der Lernenden mit der Software vermieden werden kann. Schließlich soll die Energie des Schülers für den Lernprozess und nicht etwa für einen unnötig schweren Umgang mit der elektronischen Bedienoberfläche eingesetzt werden.

---

<sup>42</sup> Vgl. Moriz, W.: Blended-Learning. S. 61-71.



Bildschirmseiten stellen den Lernenden alle wichtigen Informationen dar. Da sich der Lesevorgang auf Bildschirmen schwieriger gestalten kann als bei Büchern, sollte die dargestellte Seite nicht mit mehr als 1/3 Text bedeckt sein. Dieser sollte zur Förderung eines durchgehenden Leseflusses als Blocksatz ausgerichtet sein. Aus typografischer Sicht ist im Idealfall die für lange Texte vorgesehene Schriftart Arial mit Schriftgrößen zwischen 10-16 pt zu wählen. Darstellungen großer Textmengen gewinnen durch kurze prägnante Sätze und eine Gliederung in Abschnitte erheblich an Übersichtlichkeit. Freie Flächen können gut zur Einbindung von Grafiken oder anderen multimedialen Elementen genutzt werden. Diese übernehmen eine didaktische Funktion in dem Sinne, dass sie nebenstehende Texte durch Bildung von Assoziationen ergänzen und tragen auf diesem Weg in hohem Maße zur Erklärung und Veranschaulichung von Sachverhalten bei.

Der Computer als Interaktionsmedium ermöglicht einem Schüler, auf seine elektronische Lernumgebung direkt einzuwirken. Interaktionen zwischen Lernendem und Computer entsprechen einem völlig neuen Lerncharakter und sind von besonderer didaktischer Relevanz. Die Eigenständigkeit des Schülers wird betont, selbstgesteuertes Lernen wird gefördert und in den Lernsequenzen können höhere Motivationsgrade erreicht werden. Typische Interaktionskomponenten sind Buttons oder Links, die den Anwender zu anderen Seiten weiterleiten. Als andere mögliche Objekte können Animationen oder Glossare in die Software eingebunden werden. Bei der Gestaltung der Software ist auf eine einfache intuitiv bedienbare Benutzeroberfläche zu achten, um einer Gefahr der Überforderung vorzubeugen.

Am Ende jedes Abschnitts lassen sich Übungsaufgaben zur Motivationsförderung, vor allem aber zur Sicherung des Lernerfolgs implementieren. Die Schüler überprüfen ihr erworbenes Wissen und können eigene Schwachpunkte aufdecken. Zur Vermeidung von Defiziten sollte ihnen anschließend die Möglichkeit eingeräumt werden, auf zuvor genutzte elektronische Lerninhalte erneut zugreifen zu können.

### **3.10 Evaluation von E-Learning-Software**

Eine Software ist hinsichtlich der Eignung zur Vermittlung von bestimmten Lerninhalten an bestimmte Lernende zu untersuchen und es ist zu klären, ob sich die formulierten Lernziele mittels der zugrunde liegenden Lernmethoden effizient umsetzen lassen. Stark positiven Einfluss auf die Motivation haben besonders praxisorientierte Lernumgebungen. Die



Anwendungen verfügen im Idealfall über Elemente der Kommunikation und der Erfolgssicherung, um die Lernenden bei ihrem Lernprozess begleiten und unterstützen zu können. Bedienoberflächen sind übersichtlich und ansprechend zu gestalten und sollten den Schüler zur interaktiven Nutzung einladen. Didaktisch wertvolle Lernsoftware berücksichtigt zudem die unterschiedlichen Bedürfnisse jedes Schülers, indem durch die Gestaltung von Freiräumen Möglichkeiten zur Selbststeuerung vorgesehen werden.

### **3.11 Betreuung der Lernenden in E-Learning-Sequenzen**

Basis für eine elektronische Betreuung sind in eine Lernsoftware integrierte Informations- und Kommunikationstechnologien (kurz: IKT). Dabei wird zwischen asynchronen (zeitversetzten) und synchronen (zeitgleichen) IKT differenziert<sup>43</sup>. Über diese erfolgt nicht nur die Kommunikation zwischen Lehrkraft und Schülern, sondern auch die Bereitstellung und Vermittlung von Lerninhalten.

Asynchrone IKT zeichnen sich dadurch aus, dass die Benutzer zu unterschiedlichen Zeiten auf diese zugreifen können. Es lassen sich Informationen für die Lernenden bereitstellen, ohne dass dabei die direkte Anwesenheit des Lehrenden erforderlich ist. In Foren, auf Pinnwänden oder per E-Mail formulieren Schüler ihre Fragen, die die Lehrkraft dann zu einem späteren Zeitpunkt beantwortet. Auch ein Austausch über vordefinierte Themenbereiche zwischen den Lernenden ist auf dieser Basis denkbar. Große Mengen an Informationen können übersichtlich durch Glossare oder Wikis dargeboten werden, wobei die letztgenannte IKT jedem Schüler die Möglichkeit bietet, selbst verfasste Texte einzubringen und vorhandene Artikel durch eigene Sätze zu ergänzen.

Synchrone IKT sind dadurch charakterisiert, dass alle Benutzer zur gleichen Zeit anwesend sind. Hierdurch wird für die Lehrkraft eine direkte computergestützte Betreuung möglich, sodass auf Fragen und Probleme sofort eingegangen werden kann. Beispiele hierfür sind Instant Messenger oder moderierte Chats. Auch Audio- oder Videokonferenzen sind theoretisch denkbar, können ihr Potential bei schulischen E-Learning-Phasen aber nicht ausnutzen, da diese für Teilnehmer an verschiedenen Lernorten konzipiert worden sind. Die für Schulen wohl wichtigste synchrone IKT ist das interaktive Whiteboard. Auf dieser von allen Benutzern auf dem Computerbildschirm einsehbaren virtuellen Tafel lassen sich Texte verfassen, Grafiken, Videos und Animationen importieren oder Inhalte externer Dateien

---

<sup>43</sup> Vgl. Obrist, M.: Methoden des Blended-Learning. S. 2-6.



darstellen. Mittels Whiteboard stellt der Lehrende wichtige Informationen bereit, die neben Erklärungen zu wichtigen Sachverhalten auch aus Tipps zur Motivationsförderung bestehen können. Schülern wird durch den Einsatz dieser IKT ermöglicht, am Ende einer Lernsequenz den Mitschülern eigene Ergebnisse zu präsentieren.

### **3.12 Motivation als wichtiger Bestandteil einer E-Learning-Sequenz**

Da aus einem hohen Grad an Motivation nachweislich ein qualitativ hoher Lernerfolg resultiert, kommt diesem Begriff bei der Planung von Lernsequenzen eine zentrale Bedeutung zu. Lernmotivation aktiviert das Verhalten der Schüler, energetisiert den Lernprozess, gibt die Zielrichtung vor und beeinflusst die Dauer des Lernvorgangs. Problematisch ist die Motivation beim E-Learning, weil die Schüler über elektronische IKT nur geringfügig dazu angeregt werden können, Lernaktivitäten zu entwickeln. In den Präsenzphasen eines Blended-Learning-Arrangements kann eine Förderung der Motivation wesentlich leichter erfolgen. Für klassische und elektronische Lernumgebungen können gleichermaßen die sechs motivationsrelevanten Bedingungskomplexe<sup>44</sup> angegeben werden:

1. Wahrgenommene inhaltliche Relevanz des Lernstoffs:  
Anwendungsbezug, Realitätsnähe
2. Wahrgenommene Instruktionsqualität:  
gezieltes Situieren, Handlungsorientierung
3. Wahrgenommenes inhaltliches Interesse beim Lehrenden:  
Engagement, Enthusiasmus
4. Wahrgenommene soziale Einbindung:  
kollegialer Umgang, kooperatives Arbeiten
5. Wahrgenommene Kompetenzunterstützung:  
Rückmeldung, informierendes Feedback
6. Wahrgenommene Autonomieunterstützung:  
Unterstützung von selbstständigem Erkunden und Lernen

Speziell für die Förderung der Motivation im Bereich des E-Learning ist das sogenannte ARCS-Modell<sup>45</sup> konzipiert worden. ARCS entspricht den Abkürzungen folgender englischer Begriffe:

---

<sup>44</sup> Vgl. Ferdinand, Peter: Selbstgesteuertes Lernen in den Naturwissenschaften. Eine Interventionsstudie zu den kognitiven und motivationalen Effekten eines Blended Learning Ansatzes. Hamburg: Verlag Dr. Kovač 2007. S. 89.

<sup>45</sup> Vgl. Marx, J.: Motivationale Aspekte beim E-Learning. S. 47-51.



- Attention: Aufmerksamkeit
- Relevance: Bedeutsamkeit
- Confidence: Zuversicht
- Satisfaction: Zufriedenheit

Zur Erreichung der *Aufmerksamkeit* leisten multimediale Anwendungen (Grafiken, Videos, Animationen) einen wesentlichen Beitrag. Ferner lassen sich hiermit Lerntexte ergänzen, veranschaulichen und deutlich attraktiver vermitteln. Zu aktivem Denken und Handeln wird durch Einbringen von Interaktionsmöglichkeiten angeregt.

Elektronische Lernumgebungen sind für Lernende dann von besonderer *Bedeutsamkeit*, wenn sie sich von diesen persönlich angesprochen fühlen. Hier spielen, wie bereits erwähnt, geeignete audiovisuelle Medien eine wichtige Rolle. Zudem bewirkt die Verwendung von praxisbezogenen Sachverhalten eine größere Akzeptanz bei den Lernenden. Motivationsfördernd ist neben der Vorgabe von konkreten Zielen besonders eine elektronische Lernerfolgssicherung, wodurch den Schülern die Wichtigkeit der Lerninhalte bewusst wird. Das mit negativen Aspekten assoziierte isolierte Lernen kann aufgebrochen werden, indem die Bildung von Partner- oder Gruppenarbeit seitens der Lehrkraft und der Technik erlaubt wird.

Die *Zuversicht* eines Lernenden wächst, wenn ihm die für einen erfolgreichen Lernprozess benötigten Materialien in angemessenem Schwierigkeitsgrad und in strukturierter Weise bereitgestellt werden. Während der Bearbeitung von Aufgaben lassen sich höhere Motivationsgrade durch regelmäßige positive Verstärkungen begünstigen. Der Schüler kann an zusätzlichem Selbstvertrauen gewinnen, wenn er seinen Lernprozess individuell steuern kann. Seitens der elektronischen Lernumgebung müssen hierfür zahlreiche Interaktionsmöglichkeiten geschaffen werden, während die Lehrkraft ein individuelles Lerntempo gewährleisten muss.

Bei den Schülern stellt sich zum Abschluss einer Lernsequenz *Zufriedenheit* ein, wenn sie vorgegebene Lernziele individuell erreichen konnten. Eine wichtige Voraussetzung hierfür ist ein in sich stimmiger Lernprozess, für den seitens der Lehrkraft sicherzustellen ist, dass sich die Lernziele, -inhalte und -übungen im Einklang befinden. Zu einer hohen Zufriedenheit kann ferner beigetragen werden, indem das von den Schülern erarbeitete Wissen in die Praxis übertragen wird und beispielsweise in Lernspielen oder Simulationen Anwendung findet.

### 3.13 Argumente für und gegen den Einsatz von E-Learning

Die Ergänzung von klassischen Unterrichtsmethoden durch E-Learning bietet in einem Blended-Learning-Arrangement nachfolgend genannte positive Effekte<sup>46</sup>. Die digitalen Lerninhalte können durch die Lehrkraft immer wieder angepasst und aktualisiert werden. Besonders für die mit der Wirtschaft verzahnten und folglich einem ständigen Wandel unterliegenden Berufsbildenden Schulen spielt dieser Aspekt eine zentrale Rolle. Zudem können die Schüler die elektronischen Materialien zeit- und ortsunabhängig einsehen. Auf diesem Weg kann der Lernende, beispielsweise zur Prüfungsvorbereitung, seinen Lernprozess individuell gestalten. Er wählt gemäß seinen Vorkenntnissen eigene Schwerpunkte, bestimmt die Intensität der Auseinandersetzung mit einem Themenbereich und arbeitet in seinem Lerntempo. Hierdurch kann der Einsatz von E-Learning einen deutlichen Beitrag zum individuellen und selbstgesteuerten Lernen leisten. Als weiterer Vorteil kann die elektronische Betreuung der Schüler und die Kommunikation zwischen den Schülern angegeben werden, die auch außerhalb des Unterrichts erfolgen kann. Bei jüngeren Lernenden, die bereits mit einem Computer aufgewachsen sind und diesen sehr schnell als Lernmedium akzeptieren werden, lassen sich höhere Motivationsgrade als beim klassischen Arbeiten mit Büchern erwarten. Zudem wird durch die intensive Auseinandersetzung mit multimedialen Lerninhalten die Medienkompetenz nachhaltig gefördert. E-Learning bietet zur Veranschaulichung von Lerninhalten eine breite Palette an verwendbaren Medien an. Dadurch können Lerninhalte abwechslungsreicher und attraktiver dargeboten werden, sodass sich unter diesem Aspekt für einen computergestützten Unterricht ein didaktischer Mehrwert ergibt. Da primär der Computer die Aufgabe der Informationsvermittlung übernimmt, steht der Lehrkraft mehr Zeit zur Verfügung, einzelne Schüler bei ihren Schwierigkeiten individuell zu betreuen.

Neben den vielen Vorteilen existieren beim Einsatz von E-Learning auch einige nachteilige Aspekte<sup>47</sup>. Das Arbeiten mit dem Computer kann bei einzelnen Schülern unter Umständen zu Ablenkungen führen, wenn dieser nicht als Lernmedium akzeptiert und als Spielgerät zweckentfremdet wird. Zur Vorbeugung sind softwarespezifische Maßnahmen zur Einschränkung des technischen Handlungsraums der Lernenden zu treffen. Nachteilig für eine Lehrkraft ist der für die Planung von E-Learning-Phasen benötigte hohe Aufwand, der aus der Berücksichtigung vieler Faktoren einer mediendidaktischen Konzeption resultiert. Aufgrund

---

<sup>46</sup> Vgl. Dreer, S.: E-Learning an berufsbildenden Schulen. S. 18-19.

<sup>47</sup> Vgl. Ebd. S. 33.



unterschiedlichster Lernbedürfnisse und ungleicher Vorkenntnisse zum Umgang mit einem Computer kann keine Eignung von E-Learning für alle Schüler ausgesprochen werden. Hier ist anzustreben, im Unterricht neben elektronischen auch konventionelle Lernmedien einzusetzen, um auf diesem Weg möglichst viele der verschiedenen Lerntypen ansprechen zu können. Die Gestaltung von zu großen Freiräumen bei der Erarbeitung von Lerninhalten kann einen Schüler mit der eigenständigen Organisation seines Lernprozesses überfordern. Ein starker Rückgang der Motivation wäre die unmittelbare Folge. Durch die Verknüpfung mit einem Präsenzunterricht ließen sich letztgenannte Effekte deutlich kompensieren.

Abschließend kann festgehalten werden, dass E-Learning-gestützte Sequenzen einen Unterricht didaktisch bereichern, indem sie zu einem individuellen und motivierenden Lernprozess mit einer hohen Lerneffektivität und -effizienz beitragen. Durch das Einbringen von Präsenzphasen im Sinne eines Blended-Learning-Arrangements werden nachteilige Aspekte von E-Learning-Phasen entscheidend eingedämmt.





## 4. Gestaltung der didaktischen Konzeption

### 4.1 Vorangehende Bemerkung

In den vorhergehenden Kapiteln 2 und 3 sind in umfassender Weise die Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie und die Aspekte eines didaktischen Ansatzes im Sinne des Blended Learning aufgezeigt worden. In diesem Kapitel gilt es nun, diese beiden Komponenten miteinander zu verzahnen und ein Konzept zu entwickeln, das Schülern des Fachgymnasiums Technik den Lernträger Brennstoffzelle unter Verwendung von Experimenten und E-Learning näher bringt.

### 4.2 Analyse der Rahmenrichtlinien

Im Folgenden sind die Rahmenrichtlinien für das Fachgymnasium Technik<sup>48</sup> zu analysieren, um im späteren Verlauf der didaktischen Konzeption konkrete Lernziele zur Brennstoffzelle als zentralen Lerngegenstand formulieren zu können.

Die Schüler erwerben Kompetenzen in dem Bereich der Analyse technischer Systeme. Sie können dabei wichtige Zusammenhänge aufzeigen und sind in der Lage, Lösungen zu entwickeln. Ferner kennen sie Methoden der Erkenntnisgewinnung, die sie entsprechend den vorliegenden technischen Problemen anwenden. Die Schüler beherrschen den Umgang mit technischen Geräten und nutzen diese in Experimenten zur Analyse der Funktion von technischen Systemen. Bei der Notierung und Präsentation von Ergebnissen wird auf unterschiedliche Darstellungsformen wie Tabellen, Grafiken oder Diagramme zurückgegriffen. Gemäß dem Lerngebiet T1 *Technische Informationen nutzen und erstellen* beschaffen und gestalten die Schüler Informationen, die den technischen Sachverhalt näher beschreiben. Dies kann in Form von technischen Zeichnungen oder Funktionsschemata erfolgen. Nach Lerngebiet T2 *Technische Systeme hinsichtlich Aufbau und Funktion analysieren* ermitteln die Schüler in Experimenten die Funktionsweise des vorliegenden technischen Systems. Sie können die Zusammenhänge zwischen einzelnen Bauteilen erläutern und beherrschen das Messen von physikalischen Größen, indem sie beispielsweise Ein- und Ausgangswerte hinsichtlich des Energieflusses der Geräte bestimmen.

---

<sup>48</sup> Rahmenrichtlinien für das Fach Technik im Fachgymnasium Technik

### 4.3 Beschreibung des Schülerarbeitskoffers

Der Schülerarbeitskoffer ist ein Produkt der Firma h-tec/Wasserstoff-Energie-Systeme GmbH, die für die Vermittlung der Brennstoffzellentechnologie technische Modelle zur Durchführung von Versuchen anbietet. Im Folgenden soll kurz auf die wesentlichen Komponenten und ihre Wirkungsweise eingegangen werden.

Die Grundplatte ist eine magnetische Unterlage für die Versuche. Alle größeren Komponenten verfügen über magnetische Füße und können sicher auf der Platte fixiert werden. Besonders für die zu Beginn des Versuchs mit Wasser gefüllten Gasspeicher ist dies von Bedeutung.



Abb. 4.1: Grundplatte

Der Elektrolyseur wandelt elektrische Energie (Strom) in chemische Energie (Wasserstoff) um. Dazu wird über die unteren beiden Anschlüsse destilliertes Wasser zugeführt. Beim Anlegen einer elektrischen Spannung (schwarzer und roter Anschluss) wird das Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff aufgespalten, die über die oberen beiden Anschlüsse in den Gasspeichern aufgefangen werden.

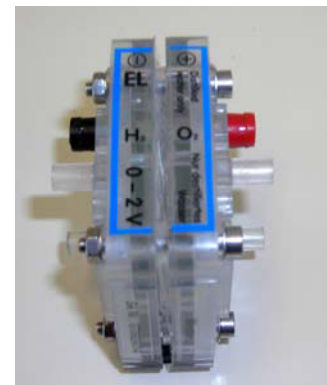


Abb. 4.2: Elektrolyseur

Die Brennstoffzelle wandelt chemische Energie (Wasserstoff) in elektrische Energie (Strom) um. Wasserstoff und Sauerstoff werden über die beiden Anschlüsse, die über Schläuche mit den Gasspeichern verbunden sind, zugeführt. Schließt man nun einen elektrischen Verbraucher über den roten und schwarzen Anschluss an die Brennstoffzelle an, kann dieser unter kontinuierlicher Zufuhr der Gase durchgehend betrieben werden.

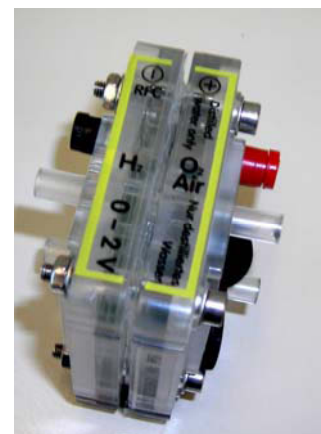


Abb. 4.3: Brennstoffzelle

Die Gasspeicher werden zu Beginn der Versuche mit destilliertem Wasser gefüllt und übernehmen demnach nicht nur die Speicherung der vom Elektrolyseur abgegebenen Gase, sondern auch die Bereitstellung des Ausgangsprodukts Wasser. Die linke Seite des Gasspeichers wird als Elektrolyseurseite (zwei Anschlüsse), die rechte Seite als Brennstoffzellenseite (ein Anschluss) bezeichnet.



Abb. 4.4: Gasspeicher

Das Multimeter mit Widerstandsdekade dient in den Versuchen der Bestimmung physikalischer Größen. Es können Spannungs-, Stromstärke und Leistungswerte ausgegeben werden. Die Schaltbilder in den einzelnen Versuchsanleitungen geben dabei vor, an welchen Komponenten das Multimeter anzuschließen ist.



Abb. 4.5: Multimeter mit Widerstandsdekade

Nebstehendes Bild zeigt den gesamten Inhalt des Schülerarbeitskoffers. An Kleinteilen werden für die Versuchsdurchführung Verschlusskappen, Verbindungskabel und Schlauchklemmen benötigt. Zur Stromerzeugung im Sinne regenerativer Energien liegt ein kleines Solarmodul bei. Als Verbraucher dienen ein Ventilator oder ein Fahrzeug. Auf weitere Komponenten soll an dieser Stelle nicht eingegangen werden, da sie in der späteren Versuchsreihe keine Verwendung finden.



Abb. 4.6: Inhalt des Schülerarbeitskoffers



#### 4.4 Bewertung des Schülerarbeitskoffers

Der Schülerarbeitskoffer bietet durch die umfangreiche Ausstattung die Möglichkeit, viele verschiedene Versuche zur Brennstoffzellentechnologie durchzuführen. Die Schüler können anhand der Versuche ein sehr gutes Verständnis für die Funktionsweise der Brennstoffzelle und der zugehörigen Komponenten entwickeln. Allerdings sind einige der beigelegten technischen Geräte für den Einsatz in Schulen aus meiner Sicht nicht sinnvoll. Die Methanol-Brennstoffzelle, bei der unter Verwendung von giftigem Methanol elektrische Energie erzeugt wird, halte ich in der Unterrichtspraxis für ungeeignet. Auch der Einsatz des beigelegten Steckernetzteils ist fragwürdig. Die Ausgangsspannung übersteigt die maximal zulässige Spannung des Elektrolyseurs von 2V erheblich, wodurch beim Verbinden der beiden Komponenten eine dauerhafte Schädigung des Elektrolyseurs eintritt. Da einige Schüler trotz Hinweisen lieber erst einmal "basteln" statt Versuchsanleitungen zu lesen, kann davon ausgegangen werden, dass der ein oder andere Elektrolyseur durch die Bereitstellung des Steckernetzteils funktionsuntüchtig wird. Mit dem beigelegten Solarmodul war auch nach mehreren Versuchen keine Leistungsabgabe zu erzielen, die annähernd dem Ergebnis aus den Beispielrechnungen des Begleitbuchs<sup>49</sup> entsprach. Auch ein im Elektronikfachmarkt besorgter Halogen-Strahler mit 75 Watt, wie er in den Versuchsanleitungen empfohlen wird, konnte keine Abhilfe schaffen. Damit sich bei den Experimenten der Schüler unnötig lange Wartezeiten zur Wasserstoffproduktion mittels Elektrolyseur vermeiden lassen, wird in der nachfolgend beschriebenen Versuchsreihe statt des Solarmoduls ein Labornetzgerät verwendet. Schade eigentlich, denn der Einsatz des Solarmoduls könnte den Schülern noch besser verdeutlichen, dass in einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft der elektrische Strom auf regenerativem Weg erzeugt wird. Die Antriebsachse des im Koffer enthaltenen Fahrzeugs lässt sich nur kurzzeitig in Rotation versetzen. Leider ist die Leistungsabgabe der Brennstoffzelle zu gering, um den Elektromotor über längere Zeit antreiben zu können.

Die Komplexität der Experimente zur Brennstoffzellentechnologie wird die Schülerversuche in der Praxis aufwändig und betreuungsintensiv gestalten, was auch aus dem Umfang der Versuchsanleitungen ersichtlich ist. Einzelne Komponenten des Koffers wirken sehr filigran und wenig langlebig und sollten von den Schülern dementsprechend vorsichtig behandelt werden. Als angehende Lehrkraft würde ich hier einen Schülerarbeitskoffer bevorzugen, der mit weniger, aber dafür solideren Komponenten ausgestattet ist.

<sup>49</sup> Voigt, Cornelia; Höller, Stefan; Küter, Uwe: Brennstoffzellen im Unterricht. Grundlagen, Experimente, Arbeitsblätter. 3. Auflage. Oberkrämer: Hydrogeit 2008.



#### **4.5 Überlegungen im Vorfeld der didaktischen Konzeption**

Wieso soll die Vermittlung der Brennstoffzellentechnologie mittels Blended Learning erfolgen? Warum werden in den Präsenzphasen Experimente durchgeführt und weshalb wird hier nicht auf klassischen Unterricht mit Büchern zurückgegriffen? Nach bereits aufgezeigten Gesichtspunkten fördern didaktisch aufbereitete E-Learning-Phasen neben der Motivation, der Medienkompetenz und der Veranschaulichung von Sachverhalten besonders einen individuellen und selbstgesteuerten Lernprozess. Auch ist bereits bekannt, dass sich nachteilige Aspekte des E-Learning in einem Blended-Learning-Arrangement vermeiden lassen. In der Konzeption werden naturwissenschaftliche Experimente in die Präsenzphasen integriert, da diese gegenüber dem klassischen Arbeiten mit Büchern einige Vorteile haben. Die Schüler werden zum eigenverantwortlichen, selbstgesteuerten und forschenden Lernen angeregt und erfassen innerhalb der Versuchsreihe den Experimentiergegenstand aus verschiedenen Blickwinkeln. Sie können sich bei Problemen gegenseitig beraten und unterstützen, wodurch auch soziales und kommunikatives Lernen gefördert werden.

Als elektronische Lernplattform für das Blended-Learning-Konzept wird das Web Based Training gewählt. Durch den Internetanschluss als Basis für das WBT kann die wichtige Voraussetzung erfüllt werden, die Schüler in E-Learning-Phasen über Informations- und Kommunikationstechnologien zu betreuen und ihnen Lerninhalte bereitzustellen. Der Kognitivismus soll das didaktische Fundament des Lehr-/Lernarrangements bilden. Die Schüler werden dabei als Individuen gesehen, die sich durch selbstständige Verarbeitung von Wissen bestimmte Sachverhalte aneignen. Der Konstruktivismus bietet den Lernenden zwar mehr Entscheidungsfreiheit, eignet sich aber durch die Komplexität der Versuchsreihe zur Brennstoffzellentechnologie weniger. Als Gestaltungsansatz für das Blended-Learning-Arrangement soll eine Kombination der explorativen und der deduktiv-heuristischen Form gewählt werden. Einerseits sind von den Schülern selbstständig Lösungen anhand bereitgestellter Materialien zu erarbeiten, andererseits ist in den Experimenten ein spezieller Fall mittels vorgegebener Regeln zu lösen.

Bei der Gestaltung des Blended-Learning-Konzepts wird von einer Klasse mit 24 Schülern ausgegangen. Für die erfolgreiche Durchführung der Unterrichtseinheit ist es wesentlich, dass die 12 Computer und die 12 Schülerarbeitskoffer in einem Arbeitsraum zur Verfügung gestellt werden. Bei den Experimenten sollen sich jeweils zwei Schüler an einem Arbeitsplatz einfinden, der mit einem PC und einem Experimentierset ausgestattet ist.

Abbildung 4.7 zeigt eine mögliche Startoberfläche des Web Based Trainings, wie sie den Schülern zur Verfügung gestellt werden könnte. Die Darstellung der Inhalte und Aktionen ist übersichtlich und leicht verständlich aufgebaut. Auf der linken Seite sind Interaktionsmöglichkeiten integriert, die den Schülern, je nach individuellen Vorkenntnissen und Eigenschaften, einen eigenständigen und selbstgesteuerten Lernprozess ermöglichen.

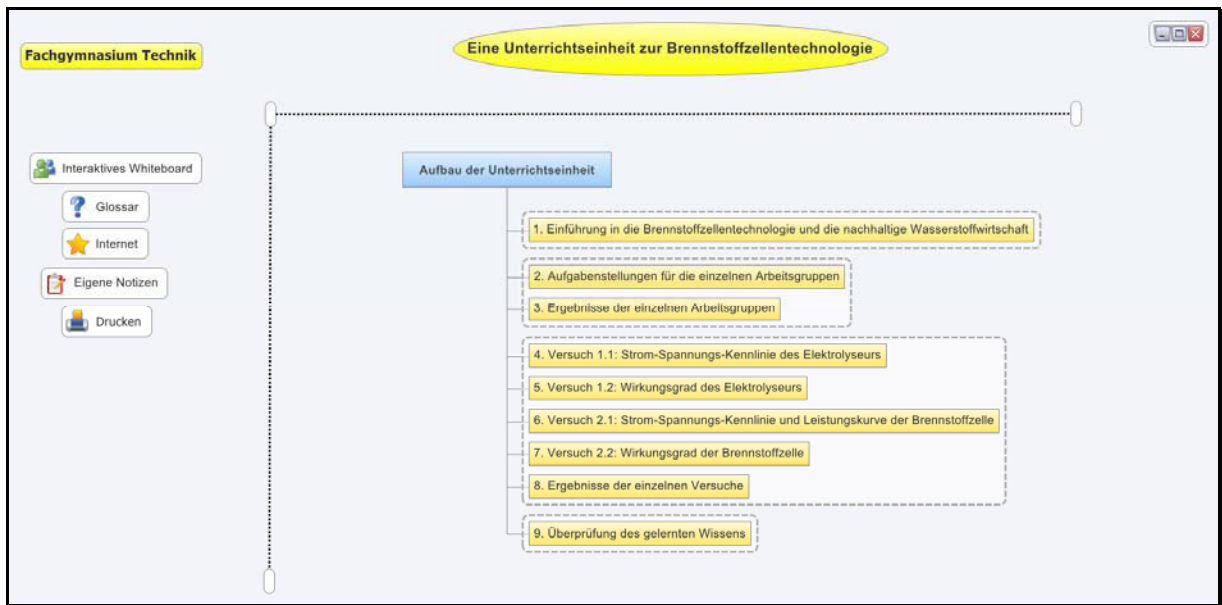


Abb. 4.7: Denkbare Startoberfläche des Web Based Trainings

Zur Betreuung der Lernenden wird eine synchrone und eine asynchrone Informations- und Kommunikationstechnologie implementiert. Ein Glossar als virtuelle Bibliothek und das Internet dienen der Erklärung wichtiger Fachbegriffe. Zusätzlich sind hier Informationen zu den einzelnen Komponenten des Schülerarbeitskoffers bereitzustellen. Um den Austausch von Texten und multimedialen Dateien zwischen Lehrkraft und Schülern zu ermöglichen, findet das interaktive Whiteboard als synchrone IKT Verwendung. Ferner soll den Schülern die Aktionsmöglichkeit gegeben werden, nach eigenem Ermessen elektronische Notizen anzufertigen, um beispielsweise wichtige Erkenntnisse aus Präsentationen oder Experimenten festzuhalten. Zudem können die Schüler jederzeit vorliegende elektronische Materialien, wie etwa die Versuchsanleitungen, ausdrucken. Besonders für diejenigen, denen das konzentrierte Ablesen von der Bildschirmoberfläche etwas schwerer fällt, ist diese Funktion von Bedeutung. Die im Hauptfenster dargestellte Struktur gibt den Schülern einen Überblick über die Unterrichtseinheit. Die gelb hinterlegten Unterpunkte sind als Links zu verstehen, die den Benutzer nach dem Anklicken zu einer neuen Seite weiterleiten. Auf diese Weise werden den Schülern wichtige Informationen und Anleitungen zur Versuchsdurchführung elektronisch bereitgestellt. Die Umrandungen von Feldern stellen die Unterteilung der Unterrichtseinheit in



vier Phasen dar. Der letzte Unterpunkt *Überprüfung des gelernten Wissens* dient neben der Lernerfolgssicherung der Verdeutlichung der Wichtigkeit des Lerninhalts, regt zur intensiven Auseinandersetzung mit der Thematik an und trägt auf diesem Weg zur Motivation der Lernenden bei.

Die Schüler sollen über die gesamte Unterrichtseinheit ein umfassendes Verständnis für die Brennstoffzellentechnologie entwickeln. Dabei ist es nach Kapitel 3.12 besonders motivationsfördernd, wenn von den Schülern selbst erarbeitetes Wissen in Simulationen umgesetzt werden kann. Hierfür werden die Schüler in die Lage von Ingenieuren eines Energiekonzerns versetzt, deren Aufgabe es ist, eine virtuelle Siedlung ausschließlich mittels Brennstoffzellentechnologie unter Verwendung von regenerativen Energien zu versorgen. In den folgenden Teilkapiteln werden nun die einzelnen Phasen der Unterrichtseinheit näher erläutert.

#### 4.6 Erste Phase der Unterrichtseinheit

Die erste Phase der Unterrichtseinheit wird gemäß den Empfehlungen gestaltet, bei umfangreichen und komplexen Sachverhalten mit einer Präsenzphase zu beginnen. Die Lehrkraft stellt in Form von Frontalunterricht die Thematik vor und gibt zur Orientierung einen Überblick über die Unterrichtseinheit. Dabei hat sie als besondere Aufgabe, die Schüler gezielt zu motivieren, indem der Grundgedanke und die Notwendigkeit der Brennstoffzellentechnologie in Verknüpfung mit der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft verdeutlicht werden. An dieser Stelle eignet sich der Einsatz folgender Folien, die den Schülern per Beamer auf einer Leinwand dargeboten werden können:

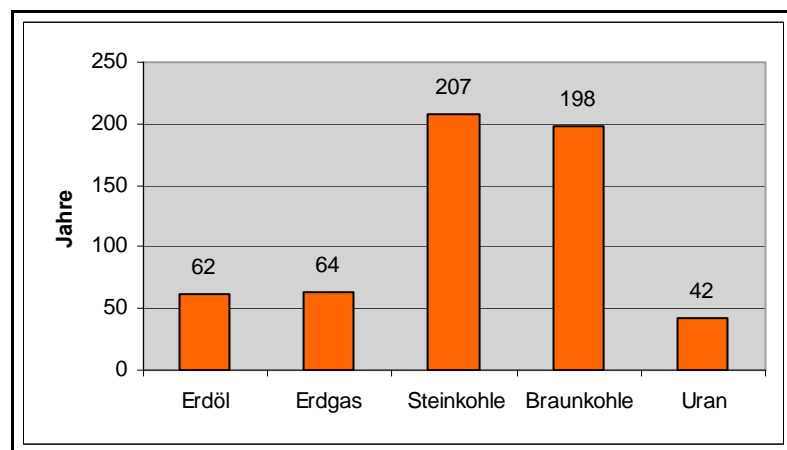


Abb. 4.8: Veranschaulichung der Notwendigkeit der Brennstoffzellentechnologie (Vgl. Abb. 2.1)

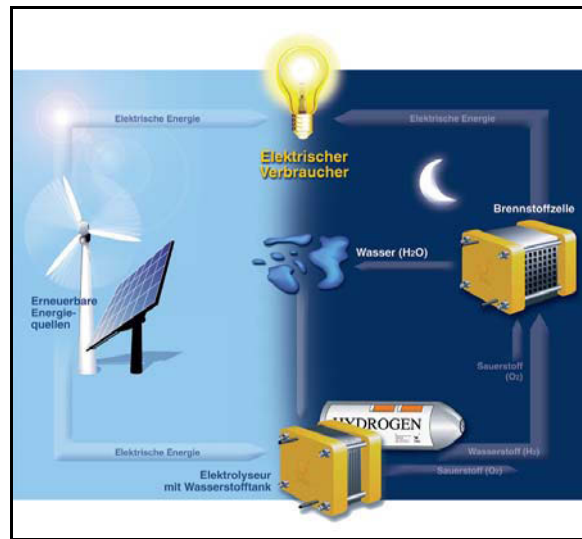


Abb. 4.9: Veranschaulichung des Grundgedanken der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft (Vgl. Abb. 2.8)

Auf die genaue Funktionsweise einzelner Komponenten soll an dieser Stelle noch nicht eingegangen werden, da sich die Schüler in der anschließenden Phase unter Verwendung von elektronischen Lernmaterialien dieses Wissen selbst erarbeiten werden.

Eine an die Leinwand projizierte übergeordnete Aufgabenstellung, die das Interesse der Lernenden wecken soll, kann von einem Schüler vorgelesen werden:

Sie sind Mitglied eines Teams von Ingenieuren eines großen Energiekonzerns, das den Auftrag erhält, eine am Fluss liegende Siedlung mit moderner Brennstoffzellentechnologie auszustatten. Der von den Brennstoffzellen benötigte Wasserstoff ist mittels Elektrolyse und ausschließlich aus regenerativen Energienquellen zu gewinnen. Ihre Aufgabe besteht darin, sich zunächst über die Funktionsweise einzelner Komponenten der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft zu informieren. Präsentieren Sie Ihre Ergebnisse auch den anderen Mitgliedern des Teams. Führen Sie anschließend eine Versuchsreihe durch, um für Ihre Berechnungen wichtige Kennwerte zu erhalten. Ermitteln Sie zum erfolgreichen Abschluss Ihres Auftrags, wie die Solarzellen, Windkraftanlagen und Wasserkraftwerke ausgelegt werden müssen, um den gesamten Energiebedarf der Siedlung decken zu können.

Abb. 4.10: Übergeordnete Aufgabenstellung



Die nachfolgend dargestellte technische Skizze der Siedlung entspricht dem Verständnis der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft. Mittels Solarzellen, Windkraftanlagen und Wasserkraftwerken wird elektrischer Strom gewonnen. Dieser wird zur Erzeugung von Wasserstoff durch Elektrolyse genutzt, wobei das hierfür benötigte Wasser aus dem an die Siedlung angrenzenden Fluss entnommen wird. Die abstrakte Darstellung soll den Schülern dazu dienen, den Energiefluss und zu berücksichtigende Verbraucher auf einen Blick zu erfassen. Die grün markierten Felder bilden dabei die Basis für die Elektrolyse, während rot umrandete Felder die Verbrauchergruppen repräsentieren.

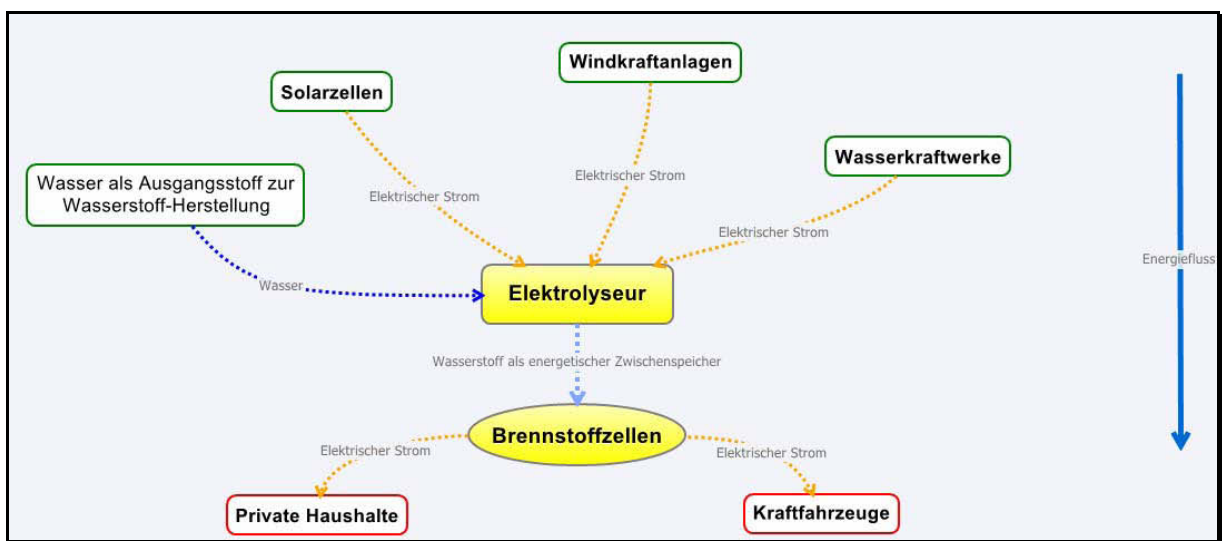


Abb. 4.11: Technische Skizze der Siedlung

Alle von der Lehrkraft verwendeten Lernmaterialien sind den Schülern über den Link *Einführung in die Brennstoffzellentechnologie und die nachhaltige Wasserstoffwirtschaft* bereitzustellen, damit bei Bedarf auf diese zurückgegriffen werden kann.

Am Ende der ersten Unterrichtsphase verfügen die Schüler über folgende Kompetenzen:

- Lernziel 1.1: Die Schüler erkennen die Problematik der aktuellen Energiewirtschaft und verstehen, weshalb in Zukunft andere Energiequellen zur Versorgung aller Verbraucher benötigt werden.
- Lernziel 1.2: Die Schüler formulieren den Ansatz einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft. Sie übertragen dieses zugrunde liegende Verständnis auf die virtuelle Siedlung und erfassen dabei das Potential der Brennstoffzellentechnologie.



#### 4.7 Zweite Phase der Unterrichtseinheit

Nachdem die Einleitung in die Thematik in Form von lehrerzentriertem Präsenzunterricht erfolgt ist, stehen nun die Lernenden im Vordergrund. Sie werden im Rahmen der zweiten Phase durch die Erkundung des Sachverhalts auf die Grundlagen der Versuchsreihe vorbereitet. Gemäß dem Lerngebiet T1 *Technische Informationen nutzen und erstellen* sind nun mittels E-Learning selbstständig Informationen einzuholen, aufzubereiten und zu gestalten, sodass diese am Ende der Unterrichtsphase den anderen Teilnehmern präsentiert werden können. Als elektronische Lehr-/Lernmethode findet hier ein Online Assignment Verwendung. Die Lehrkraft stellt dabei didaktisch aufbereitete Materialien über das implementierte Glossar zur Verfügung. Zum Üben des Umgangs mit Suchmaschinen und des Auswählens geeigneter Webinformationen kann auch das Internet als weitere Informationsquelle genutzt werden. Die Lehrkraft teilt die Klasse in verschiedene Teams ein:

- Arbeitsgruppe 1: Gewinnung von elektrischem Strom mit Solarzellen
- Arbeitsgruppe 2: Gewinnung von elektrischem Strom mit Windkraftanlagen
- Arbeitsgruppe 3: Gewinnung von elektrischem Strom mit Wasserkraftwerken
- Arbeitsgruppe 4: Funktionsweise der Elektrolyse
- Arbeitsgruppe 5: Eigenschaften von Wasserstoff
- Arbeitsgruppe 6: Funktionsweise der Brennstoffzelle
- Arbeitsgruppe 7: Die Brennstoffzelle in der Fahrzeugtechnik und der Hausenergieversorgung

Die Teams erhalten ihre Aufgaben unter dem Link *Aufgabenstellungen für die einzelnen Arbeitsgruppen*. Es gilt nun, geeignete Informationen zu beschaffen und diese in aufbereiteter Form in einer Präsentation zusammenzufassen. Anschließend sind die erarbeiteten Ergebnisse den anderen Teams mittels interaktivem Whiteboard oder auch Beamer vorzustellen und zu erläutern. Ziel dabei ist es, dass am Ende der Unterrichtsphase jeder Schüler umfangreiches Wissen aus den verschiedenen Themenbereichen der einzelnen Arbeitsgruppen erworben hat und somit alle Lernenden über das gleiche Wissensspektrum verfügen. Für Teams, die die Aufgabenstellung weniger ernst nehmen, kann von der Lehrkraft die im späteren Verlauf erfolgende Wissensüberprüfung angeführt werden. Denn welche Arbeitsgruppe möchte dafür verantwortlich sein, wenn die Mitglieder der übrigen Teams bei der Beantwortung von Fragen aus dem von ihr zu vermittelnden Themenbereich große Defizite aufweisen?

Die Lehrkraft hat im Vorfeld die Aufgabe, durch geeignete Formulierung der Aufgabenstellungen den von den Teams zu erarbeitenden Themenbereich gezielt einzuschränken, damit sich zu große Abweichungen vom eigentlichen Kern vermeiden lassen. Während der Bearbeitungszeit werden die Lernenden individuell betreut und unterstützt. Bei leistungsschwächeren Teams besteht die Möglichkeit, über das interaktive Whiteboard Informationen gezielt bereitzustellen. Dadurch kann eine eventuell auftretende Frustrationsphase abgefangen und der Arbeitsgruppe zu neuer Motivation verholfen werden. Während der Informationssammlung und der Präsentationserstellung ist von der Lehrkraft der kontinuierliche Arbeitsfortschritt der einzelnen Gruppen sicherzustellen, sodass am Ende dieser Unterrichtsphase inhaltlich korrekte und gut aufbereitete Vorträge gewährleistet werden können. Durch die benötigte soziale Interaktion für einen erfolgreichen Lernprozess wird besonders das kooperative Lernen gefördert. Die Schüler arbeiten in Gruppen zusammen und müssen sich selbst organisieren, wodurch nach zuvor aufgezeigten Gesichtspunkten ein deutlicher Beitrag zur Motivationssteigerung geleistet wird. Ferner bereichern sie durch die Erstellung der Präsentation ihre Medienkompetenz und sammeln bei der Darbietung der Ergebnisse wichtige Erfahrungen im Vortragen vor ihren Mitschülern.

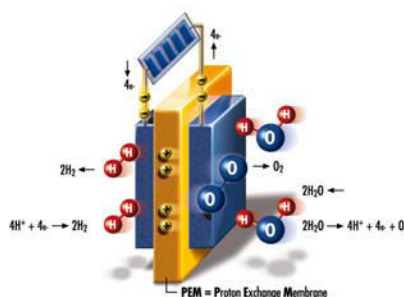
Im Nachfolgenden wird beispielhaft eine Aufgabestellung vorgestellt. Übrige Arbeitsanleitungen können im Anhang eingesehen werden.

#### Arbeitsgruppe 4: Funktionsweise der Elektrolyse

Erklären Sie das Prinzip der Elektrolyse.

Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Worauf basiert die Elektrolyse? Nennen Sie wichtige Grundvoraussetzungen.
2. Geben Sie die energetische Eingangs- und Ausgangsgröße eines Elektrolyseurs an. Wie lautet die chemische Reaktion bei der Elektrolyse?
3. Beschreiben Sie den Aufbau eines Elektrolyseurs und beziehen Sie sich dabei auf die unten dargestellte Abbildung.



4. Formulieren Sie die Bedeutung des Elektrolyseurs innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

Abb. 4.12: Beispiel einer Aufgabestellung



Die Aufgabenstellung wird den Schülern aus Gründen der Übersichtlichkeit in gegliederten und kurzen prägnanten Sätzen bereitgestellt. In dieser Anleitung wurde bereits eine Grafik vorgegeben, da auch andere Komponenten der Brennstoffzellentechnologie über obiges Farbschema (blaue Elektroden und gelbe Elektrolytmembran) verfügen und auf diesem Weg von den Schülern leichter Assoziationen gebildet werden können. In allen anderen Aufgabenstellungen wird explizit dazu angeregt, zur Veranschaulichung der Thematik Grafiken in die Präsentation einzubinden. Am Ende der Anleitungen sind von den Teams die Bedeutungen der einzelnen Komponenten innerhalb der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft anzugeben, um auf diesem Weg das verstehende Lernen zu fördern. In den Arbeitsgruppen, die sich mit Solarzellen, Windkraftanlagen und Wasserkraftwerken befassen, sind Informationen zum Wirkungsgrad einzuholen. Bei dem Elektrolyseur und der Brennstoffzelle wird hierauf bewusst verzichtet, da der Wirkungsgrad in der anschließenden Versuchsreihe experimentell zu ermitteln ist. Die Formulierungen der Leitfragen sind so ausgelegt, dass zwischen den einzelnen Präsentationen Schnittmengen entstehen können. Dadurch wird eine Verzahnung der einzelnen Themenbereiche angestrebt, mit dem Ziel, den Schülern verschiedene Aspekte der Brennstoffzellentechnologie in einem Gesamtbild darzubieten.

Die von den einzelnen Teams erarbeiteten Ergebnisse werden als Präsentationen in dem Unterpunkt *Ergebnisse der einzelnen Arbeitsgruppen* gespeichert. So kann ein Schüler auch noch im weiteren Verlauf der Unterrichtseinheit wichtige Informationen einsehen und eventuelle Defizite ausgleichen.

Am Ende der zweiten Unterrichtsphase verfügen die Schüler über folgende Kompetenzen:

- Lernziel 2.1: Die Schüler holen aus unterschiedlichen Quellen wichtige Informationen ein, bewerten sie hinsichtlich ihrer Brauchbarkeit und geben sie in Form von Präsentationen an die Mitschüler weiter.
- Lernziel 2.2: Die Schüler erwerben im Rahmen der einzelnen Präsentationen ein breites Wissensspektrum über die Brennstoffzellentechnologie.
- Lernziel 2.3: Die Schüler nennen die regenerativen Energiequellen einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft, beschreiben ihre Wirkungsweise hinsichtlich der energetischen Umwandlung und erfassen ihre Bedeutung innerhalb der Wasserstoffwirtschaft.



- Lernziel 2.4: Die Schüler verstehen die Funktionsweise der Elektrolyse von Wasser und erkennen den Elektrolyseur als eine zentrale Komponente der Wasserstoffwirtschaft.
- Lernziel 2.5: Die Schüler nennen grundlegende Eigenschaften von Wasserstoff und erfassen, mit welchen Vorteilen und Problematiken dieser Energieträger verbunden ist.
- Lernziel 2.6: Die Schüler verstehen die Funktionsweise der Brennstoffzelle, erkennen sie als eine zentrale Komponente der Wasserstoffwirtschaft und zeigen vor- und nachteilige Aspekte dieser Technologie auf.
- Lernziel 2.7: Die Schüler können Anwendungsgebiete der Brennstoffzellentechnologie angeben und zeigen insbesondere auf, wie diese in der Fahrzeugtechnik und der Hausenergieversorgung umgesetzt wird.

#### **4.8 Dritte Phase der Unterrichtseinheit**

Die Schüler haben in der zweiten Phase der Unterrichtseinheit den Grundgedanken einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft verinnerlicht. Sie können einzelne Komponenten benennen und deren Wirkungsweise präzise erläutern. Im Rahmen der Versuchsreihe werden nun die Anforderungen des Lerngebiets T2 *Technische Systeme hinsichtlich Aufbau und Funktion analysieren* erfüllt. Die Schüler nehmen in Partnerarbeit wieder die Rolle der Ingenieure des Energiekonzerns ein, die nun experimentell die für ihre späteren Berechnungen benötigten Wirkungsgrade des Elektrolyseurs und der Brennstoffzelle ermitteln. Zu Beginn der Phase ist auf sicherheitstechnische Maßnahmen, wie beispielsweise maximal zulässige elektrische Spannungen einzelner Komponenten, hinzuweisen, um möglichen Beschädigungen vorzubeugen. Die zentrale Aufgabe der Lehrkraft während dieser Phase ist es, über den gesamten Zeitraum der Versuchsdurchführungen beratend zur Seite zu stehen. Durch die Komplexität einzelner Schritte muss an dieser Stelle mit eventuell auftretenden Schwierigkeiten gerechnet werden. Die benötigten Anweisungen für die Experimente sind den Schülern über die elektronische Lernplattform bereitzustellen und können über die einzelnen Links direkt aufgerufen werden. Als Orientierung zur Versuchsreihe dient das speziell auf den Schülerarbeitskoffer zugeschnittene Begleitbuch *Brennstoffzellen im Unterricht* von Cornelia Voigt u. a. (siehe auch Literaturangaben).

Nachstehend ist exemplarisch eine der Versuchsanleitungen abgebildet, auf die im direkten Anschluss genauer eingegangen wird.



### I) Hintergrundinformationen

Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist allgemein definiert als das Verhältnis von der Nutzleistung  $P_{ab}$  zu der zugeführten Leistung  $P_{zu}$ .  $\eta$  gibt dabei an, wie viel der zugeführten Energie  $E_{zu}$  als tatsächlich nutzbare Energie  $E_{ab}$  von einem technischen System abgegeben wird. Die nicht nutzbare Leistung wird als Verlustleistung bezeichnet und errechnet sich aus der Differenz der zugeführten und der nutzbaren Leistung. Der Wirkungsgrad  $\eta$  liefert eine Aussage über die Effizienz von Energiewandlern und kann Werte zwischen 0 und 1 oder in prozentualer Schreibweise Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen. Je größer der Wirkungsgrad, desto effizienter ist das technische System. Im folgenden Versuch wird der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bestimmt. Die notwendigen Größen zur Berechnung der zugeführten Energie (Wasserstoff) und der Nutzenergie (elektrischer Strom) liefert die Versuchsauswertung. Verwenden Sie zur Ermittlung des Wirkungsgrads folgende Formeln und Kennwerte:

Wirkungsgrad  $\eta$ : 
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} = \frac{E_{elektrisch}}{E_{Wasserstoff}}$$

Nutzenergie: 
$$E_{ab} = E_{elektrisch} = U^* \cdot I^* \cdot t$$

Zugeführte Energie: 
$$E_{zu} = E_{Wasserstoff} = V_{H_2} \cdot H_{H_2}$$

Anmerkungen: 
$$U^* \triangleq \text{Mittelwert der Spannung}$$

$$I^* \triangleq \text{Mittelwert der Stromstärke}$$

$$\text{Heizwert } H_{H_2} = 10,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 3,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$$

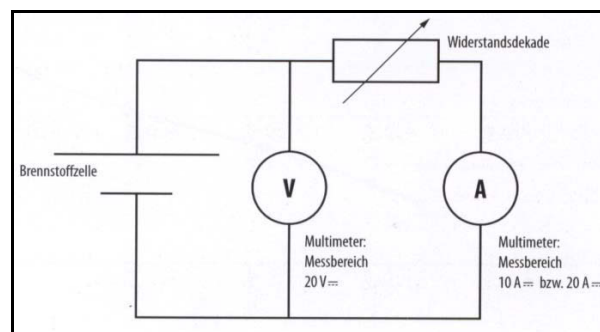
Der Heizwert von Wasserstoff  $H_{H_2}$  gibt an, welche Menge an Energie bei einer Verbrennung von 1 m<sup>3</sup> Wasserstoff genutzt werden kann.

Abb. 4.13: Seite 1 einer beispielhaften Versuchsanleitung

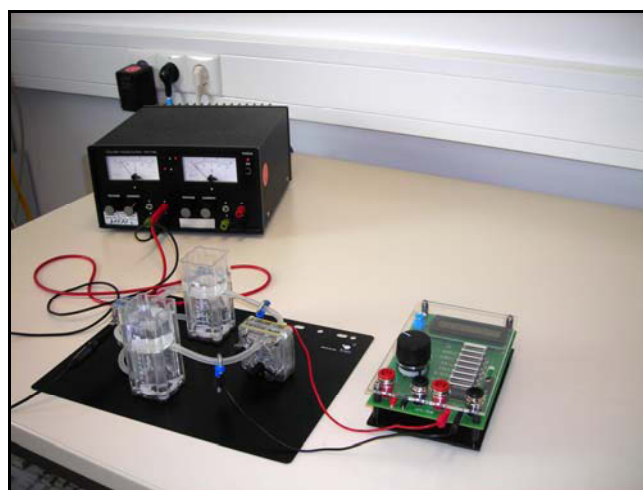
## II) Material

- Grundplatte
- Elektrolyseur
- Brennstoffzelle
- 2 Gasspeicher
- Multimeter mit Widerstandsdekade
- Spannungsquelle (Labornetzgerät)
- Fahrzeug mit Elektromotor
- Destilliertes Wasser
- 2 Verschlusskappen
- 2 Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz)
- 6 Schläuche (4x 6 cm, 2x 9 cm)
- 2 Schlauchklemmen

## III) Schaltbild und Aufbau des Versuchs



Versuch 2.2: Schaltbild



Versuch 2.2: Aufbau



#### IV) Anleitung

1. Setzen Sie die zwei Gasspeicher und den Elektrolyseur auf die Grundplatte. Verbinden Sie die Anschlüsse auf der Elektrolyseurseite der Gasspeicher über vier Schläuche (je 6 cm Länge) mit den Anschlüssen am Elektrolyseur. Befestigen Sie an der Brennstoffzellenseite beider Gasspeicher einen Schlauch (je 9 cm Länge) und verschließen Sie diese mit jeweils einer Schlauchklemme.
2. Befüllen Sie beide Gasspeicher bis zur oberen Markierung der Ausgleichsbehälter mit destilliertem Wasser. Öffnen Sie die Schlauchklemmen an der Brennstoffzellenseite der Gasspeicher, um Luft aus dem Elektrolyseur und den Gasspeichern entweichen lassen zu können.
3. Setzen Sie die Brennstoffzelle auf die Grundplatte und verschließen Sie die beiden unteren Anschlüsse mit einer Verschlusskappe. An den beiden oberen Anschlüssen der Brennstoffzelle werden die bereits am Gasspeicher befestigten Schläuche (je 9 cm Länge) aufgesteckt.
4. Schalten Sie das Labornetzgerät ein und wählen Sie eine Spannung zwischen 1,5 V und 2,0 V.
5. Verbinden Sie das Labornetzgerät mit dem Elektrolyseur und produzieren Sie 20 cm<sup>3</sup> Wasserstoff. Schalten Sie anschließend das Labornetzgerät wieder aus.
6. Wählen Sie am Multimeter mit Widerstandsdekade einen Widerstand, der während des Versuchs nicht mehr verändert wird (z.B.  $R = 3,3 \Omega$ ).
7. Starten Sie die Zeitmessung, wenn Sie über die Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz) die Brennstoffzelle mit dem Multimeter mit Widerstandsdekade verbinden. Tragen Sie in die untenstehende Tabelle die Werte für die Zeit  $t$  [s], die Spannung  $U$  [V] und die Stromstärke  $I$  [A] jeweils dann ein, wenn das Wasserstoffvolumen 20 cm<sup>3</sup>, 15 cm<sup>3</sup>, 10 cm<sup>3</sup>, 5 cm<sup>3</sup>, und 0 cm<sup>3</sup> beträgt. Runden Sie die vom Multimeter mit Widerstandsdekade ausgegebenen Spannungs- und Stromstärkewerte auf zwei Stellen nach dem Komma.

$V_{H_2}$ [cm <sup>3</sup> ]	$t$ [s]	$U$ [V]	$I$ [A]
20			
15			
10			
5			
0			

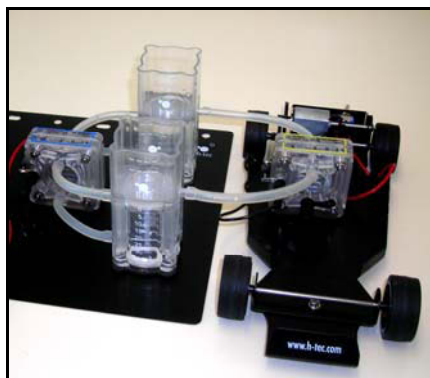
Abb. 4.15: Seite 3 einer beispielhaften Versuchsanleitung



8. Berechnen Sie den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Nutzen Sie hierfür die angegebenen Kennwerte und Formeln sowie Ihre Tabellenwerte. Runden Sie auf zwei Stellen nach dem Komma.

*(Feld zum Eintragen der Berechnungen)*

9. Zum Abschluss der Versuchsreihe können Sie nun einen Verbraucher, zum Beispiel das Fahrzeug mit Elektromotor, an die Brennstoffzelle anschließen. Entfernen Sie hierfür das Multimeter mit Widerstandsdekade und verbinden Sie die beiden Kabel des Motors (1 rot, 1 schwarz) mit der Brennstoffzelle. Heben Sie die Hinterachse des Fahrzeugs an und legen Sie den Schalter von *Off* auf *On* um.



Die Energie des Wasserstoffs wird nun von der Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt und versetzt über den Elektromotor die Antriebsachse in Rotation. Auf diese Weise ist eine Versorgung jeglicher elektrischer Verbraucher mit einer Brennstoffzelle möglich.

Abb. 4.16: Seite 4 einer beispielhaften Versuchsanleitung



Die Überschrift eines Experiments beinhaltet neben Angaben zur Sozialform auch einen ungefähren Richtwert für die Versuchsdauer, um den Schülern bei ihren Vorbereitungen eine grobe Orientierung zu geben. Zu Beginn eines neuen Versuchs erfolgt eine Einleitung in die Thematik mittels vorangestellter Hintergrundinformationen. Es werden wichtige Kennwerte definiert und Formeln für die Berechnungen angegeben. Sämtliche übrigen benötigten Größen sind von den Schülern im Rahmen des Experiments selbstständig zu ermitteln. Informationen zum Aufbau und zu einzelnen Komponenten des Versuchs werden in Form von einer Materialliste, einem Schaltbild und einem Aufbaubild bereitgestellt. Die Schaltbilder der einzelnen Versuche entstammen dem Begleitbuch und sind in den Anleitungen aus Gründen der Übersichtlichkeit nicht separat als Zitate markiert. Durch die Abhandlung der einzelnen Arbeitsschritte werden die Schüler systematisch zum Ziel des Experiments geführt. Sie entwickeln dabei ein tiefes Verständnis für die Funktionsweise der Komponenten, indem das in der zweiten Unterrichtsphase theoretisch erarbeitete Wissen in einem praktischen Lernprozess Veranschaulichung findet. Ermittelte Kenngrößen wie Spannungs-, Stromstärke-, Leistungs- oder Zeitwerte lassen sich direkt am Computer in vorgegebenen Tabellen festhalten. Das Aufzeigen von Diagrammen oder Berechnungen soll den Schülern auf elektronischem und klassischem Weg ermöglicht werden, um unterschiedliche Lerntypen zu berücksichtigen. An dieser Stelle bietet sich auch das Potential zur Kooperation mit Fachbereichen wie der Informatik, die den Umgang mit einfachen Rechen- und Tabellenkalkulationsprogrammen vermitteln könnte. Über das interaktive Whiteboard vergleichen die Schüler untereinander ihre Diagramme und Berechnungen, um Fehlerquellen innerhalb des Experiments auszuschließen. Die Ergebnisse sind im Unterpunkt *Ergebnisse der einzelnen Versuche* abzulegen und können für die späteren Berechnungen erneut eingesehen werden.

Die Einbindung von Experimenten in die Unterrichtseinheit bringt ein großes motivationales Potential mit sich. Die Schüler setzen sich auf spielerische Weise mit dem zuvor erworbenen Wissen auseinander. Sie arbeiten selbstgesteuert, kooperativ und zielorientiert, um am Ende eines Experiments den "aha"-Effekt zu erreichen. Die Versuche begünstigen einen aktiven Lernprozess, leisten dabei einen deutlichen Beitrag zum verstehenden Lernen und bewirken bei den Schülern eine Zunahme an Interesse, Engagement und Motivation.

Am Ende der dritten Unterrichtsphase verfügen die Schüler über folgende Kompetenzen:



Lernziel 3.1: Die Schüler verknüpfen durch aktives Lernen zuvor theoretisch erarbeitetes Wissen mit neuen Erkenntnissen aus der Versuchsreihe.

Lernziel 3.2: Die Schüler analysieren im Rahmen der Versuchsreihe das technische System der Brennstoffzellentechnologie und erläutern Aufbau und Funktionsweise der einzelnen Komponenten.

Lernziel 3.3: Die Schüler messen physikalische Größen und nutzen diese für ihre Berechnungen und zur grafischen Veranschaulichung naturwissenschaftlicher Zusammenhänge in Diagrammen.

#### **4.9 Vierte Phase der Unterrichtseinheit**

Die zweite und dritte Phase der Unterrichtseinheit sind in Form von Gruppenbeziehungsweise Partnerarbeit erfolgt. Die Schüler haben sich sowohl auf theoretische als auch auf praktische Weise mit der Brennstoffzellentechnologie intensiv auseinandergesetzt. Ziel dieser Phase ist es, den Lernfortschritt der gesamten Klasse zu überprüfen. Hierfür wird als Sozialform die Einzelarbeit gewählt. Die Schüler müssen bei der Beantwortung von Fragen auf ihr Wissen zurückgreifen, selbst aktiv werden und erhalten auf diesem Weg ein individuelles Feedback über ihren Leistungsstand. Die Lernerfolgssicherung lässt sich als abschließende Übung oder in Form eines Tests durchführen. Dabei wird überprüft, inwiefern die zuvor formulierten Lernziele erreicht wurden. Bei weniger ausgeprägter Motivation der Lernenden kann die Lehrkraft als Ansporn auf die übergeordnete Aufgabenstellung verweisen. Die Klasse wird erkennen, dass sie die Informationsbeschaffung (zweite Phase) und die Durchführung der Versuchsreihe (dritte Phase) bereits beendet hat und zum erfolgreichen Abschluss des Arbeitsauftrags nur noch wenige Schritte fehlen. Im Rahmen der Lernerfolgssicherung werden zunächst allgemeine Informationen zu behandelten Themen abgefragt. Im Anschluss erfolgt die Überprüfung der rechnerischen Grundlagen, indem die Schüler eigenständig die Auslegung von einzelnen Komponenten der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft bestimmen. In den vorhergehenden Phasen wurden einfache Berechnungsformeln verinnerlicht. Komplexe Formeln, notwendige Kennwerte und die Ergebnisse aus der Versuchsreihe sind über die elektronische Lernplattform bereitzustellen. Mit einem Klick auf den Link *Überprüfung des gelernten Wissens* öffnet sich ein neues Fenster und die Schüler können mit der Bearbeitung der Aufgaben beginnen.

Die Fragestellungen zur Überprüfung allgemeiner Grundlagen ähneln den Aufgaben der einzelnen Arbeitsgruppen aus der zweiten Unterrichtsphase. Aus diesen Gründen sind diese hier nicht gesondert aufgeführt, können aber im Anhang nachgeschlagen werden.

Für die Überprüfung der rechnerischen Grundlagen wird die untenstehende technische Skizze dargeboten. Die Siedlung wird durch die Verbrauchergruppen *Private Haushalte* und *Kraftfahrzeuge* symbolisiert. Zur besseren Übersichtlichkeit sind an dieser Stelle stationäre und mobile Brennstoffzellen zu einer Zelle zusammengefasst. Ausgehend von dem vorgegebenen Energiebedarf der Verbraucher werden die Schüler durch die einzelnen Aufgaben systematisch zur Lösung geführt. Diese besteht darin, die Auslegung eines Solarenergieparks, einer Windkraftanlage und eines Wasserkraftwerks so zu bestimmen, dass mittels Brennstoffzellentechnologie der gesamte Energiebedarf der Siedlung gedeckt werden kann. In der Skizze wird die angestrebte Lösung durch die Richtung des Berechnungspfeils und durch die drei Fragezeichen unterhalb der regenerativen Energiequellen verdeutlicht.

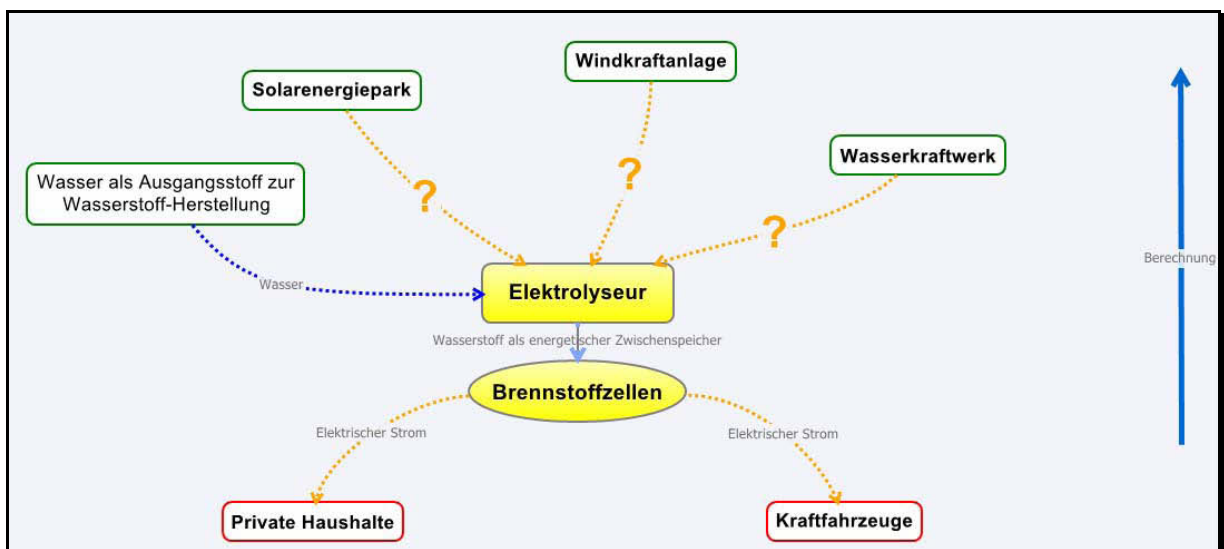


Abb. 4.17: Technische Skizze zur Auslegung der einzelnen Komponenten

Um repräsentative Energiewerte für die Siedlung zu erhalten, ist der Jahresbericht 2009 der *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen* herangezogen worden. Die Herleitung der einzelnen Größen soll an dieser Stelle nicht thematisiert werden und kann im Anhang eingesehen werden. Der Energiebedarf der einzelnen Verbrauchergruppen bezieht sich auf eine Siedlung mit rund 500 Einwohnern:

Private Haushalte:	2325 kWh pro Tag
Kraftfahrzeuge:	3690 kWh pro Tag



Auf Basis des Energiebedarfs dieser beiden Verbrauchergruppen ermitteln die Schüler die durchschnittlich benötigte Leistung der Siedlung und bestimmen darüber, mit welchem Volumenstrom an Wasserstoff die Brennstoffzellen versorgt werden müssen. Anschließend ist die elektrische abzugebende Leistung der regenerativen Energiequellen zu errechnen, damit der Elektrolyseur den benötigten Volumenstrom an Wasserstoff gewährleisten kann. Um diese elektrisch abzugebende Leistung erzielen zu können, ist die Auslegung der einzelnen Energiequellen zu bestimmen. Die Schüler werden folgende Lösungen ermitteln:

Solarenergiepark: Die Fläche der benötigten Solarzellen muss  $1033,84 \text{ m}^2$  betragen.

Wasserkraftwerk: Die Fallhöhe des Wassers auf die Turbine muss  $1,69 \text{ m}$  betragen.

Windkraftanlage: Die Länge der Rotorblätter muss  $49,78 \text{ m}$  betragen.

Die einzelnen Aufgabenstellungen können mit der jeweiligen Musterlösung und ergänzenden Anmerkungen zu verwendeten Größen im Anhang nachgeschlagen werden.

#### **4.10 Abschließende Evaluation der Unterrichtseinheit**

Am Ende jeder größeren Einheit sollte den Schülern die Möglichkeit eingeräumt werden, die letzten Unterrichtsstunden unter verschiedenen Gesichtspunkten zu bewerten. Gerade für ein Konzept im Sinne des Blended Learning, wie es in den vorherigen Teilkapiteln vorgestellt wurde, erscheint eine Evaluation als sinnvoll. Die Durchführung sollte nur eine geringe Zeit in Anspruch nehmen, sodass der Umfang der Fragen dementsprechend kurz und knapp zu gestalten ist. Eine einfache und schnelle Evaluation kann auf elektronischer Basis erfolgen, indem die Schüler durch einen Mausklick die für sie zutreffende Antwort auswählen. Nachfolgend sind denkbare Evaluationsfragen aufgeführt, die im Anschluss an die Unterrichtseinheit von den Schülern bearbeitet werden können. Die erste Zahl der Nummerierung gibt dabei an, auf welche Unterrichtsphase sich die jeweilige Frage bezieht.

- 1.1 Die Einleitung in die Thematik war gut verständlich. Die eingesetzten Medien haben den Sachverhalt veranschaulicht und mir einen leichten Einstieg ermöglicht.
- 1.2 Die Einleitung in die Thematik hat mein Interesse geweckt und mich für die anschließenden Unterrichtsstunden motiviert.
- 2.1 Ich halte es für sinnvoll, den Computer zur Beschaffung von Informationen zu nutzen.



- 2.2 Die Lernplattform und das Internet haben ausreichende Informationen für mich und meine Arbeitsgruppe bereitgestellt.
- 2.3 Die Präsentation meiner Arbeitsgruppe ist durch die elektronische Lernplattform unterstützt worden.
- 2.4 Die Präsentationen der anderen Arbeitsgruppen sind durch die elektronische Lernplattform unterstützt worden.
- 2.5 Ich habe mich für das Einholen, Aufbereiten und Präsentieren der Informationen selbst verantwortlich gefühlt.
- 3.1 Ich halte es für sinnvoll, Experimente im Unterricht einzusetzen.
- 3.2 Die Anleitungen für die Experimente sind verständlich formuliert und lassen sich gut in der Praxis umsetzen.
- 3.3 Der Schwierigkeitsgrad der Experimente ist angemessen.
- 3.4 Die Experimente haben mir geholfen, ein besseres Verständnis für den Sachverhalt zu entwickeln.
- 3.5 Ich habe mich für die Durchführung der Experimente selbst verantwortlich gefühlt.
- 4.1 Der Schwierigkeitsgrad der Wissensüberprüfung ist angemessen.
- 4.2 Die Wissensüberprüfung hat mir meine Stärken und Schwächen aufgezeigt.

Als Antwortmöglichkeiten kann jeweils gewählt werden zwischen:

☐ trifft zu    ☐ trifft zum Teil zu    ☐ trifft zum Teil nicht zu    ☐ trifft nicht zu

Auf eine neutrale "ich-weiss-nicht"-Kategorie soll an dieser Stelle bewusst verzichtet werden, um ein aussagekräftiges Feedback der Schüler erhalten zu können.

Die formulierten Evaluationsfragen decken ein breites Spektrum der den Unterricht bedingenden Faktoren ab. Neben den klassischen Elementen Verständlichkeit und Schwierigkeitsgrad des Lerninhalts wird besonders auf den Einsatz der Experimente und der elektronischen Lernplattform eingegangen. Ferner ist die Komponente der eingeräumten Selbstständigkeit und Selbstverantwortung zu bewerten. Ein Lernender betrachtet die einzelnen Faktoren eines Unterrichtsverlaufs aus einer völlig anderen Perspektive und kann sich mit Problematiken konfrontiert sehen, die von der Lehrkraft nicht zu erfassen sind. Die Schüler geben eine individuelle Bewertungen ab, formulieren eigene Anregungen und tragen auf diesem Weg zu einer Verbesserung der Unterrichtsqualität bei.



## 5. Fazit

Durch den Umfang und die Komplexität der gesamten Brennstoffzellentechnologie wird deutlich, dass für die Entwicklung eines breiten Verständnisses auch angrenzende Themen der Brennstoffzelle im Unterricht aufzuzeigen sind. Ausgehend von den experimentellen Möglichkeiten des Schülerarbeitskoffers sind im Vorfeld zu vermittelnde Lerninhalte festgelegt worden. Die Versuchsreihe kann als Kernelement der Unterrichtseinheit gesehen werden, das die Schüler in methodisch vielfältiger Weise vor- und nachbereiten.

Die aufgezeigte didaktische Konzeption vereinigt die Vorteile der einzelnen Elemente des Lehr-/Lernarrangements. Vor allem der Ansatz des Blended Learning trägt an dieser Stelle zu einer Bereicherung des Unterrichts bei. Durch die Kombination von Präsenzphasen und E-Learning lässt sich unter Berücksichtigung didaktischer Gesichtspunkte ein effektiver, effizienter und motivierender Lernprozess erzielen. Aus der Sicht der Schüler ist speziell das individuelle, selbstgesteuerte und soziale Lernen von großer Bedeutung. Das Einbringen der Versuchsreihe stellt einen weiteren positiven Aspekt dar, indem durch einen aktiven Lernprozess besonders das verstehende Lernen gefördert wird. Je nach Intensität und Umfang kann für die gesamte Unterrichtseinheit ein Zeitraum von ungefähr 8-12 Schulstunden eingeplant werden. Die Konzeption orientiert sich zwar an den Anforderungen des Fachgymnasiums für Technik, kann aber auch im Fach Technik der Fachoberschulen oder im Physik- und Chemieunterricht in die Praxis umgesetzt werden.

Das Vorgehen in den einzelnen Phasen der Unterrichtseinheit ist aus didaktischer und methodischer Sichtweise begründet worden. Die im Rahmen der Konzeption entwickelten Lernmaterialien für eine umfassende Vermittlung der Brennstoffzellentechnologie wurden direkt in der Arbeit erläutert und können allesamt im Anhang eingesehen werden. Abschließend kann festgehalten werden, dass durch die große Vielfalt an selbstaktiven Elementen bei der Erarbeitung einer interessanten und zukunftssträchtigen Technologie ein sehr lebendiger und motivierender Unterricht zu erwarten ist. Man darf gespannt sein, wie sich die ersten Versuche bei der Umsetzung der entwickelten Konzeption gestalten werden.

Erzähle mir und ich vergesse.

Zeige mir und ich erinnere.

Lass mich tun und ich verstehe.

*Konfuzius*



## **6. Anhang**

### **6.1 Erklärung des Prüflings der selbstständigen Verfassung der Arbeit**

### **6.2 Aufgabenstellung der Bachelorarbeit**

### **6.3 Entwickelte Lernmaterialien und ergänzende Anmerkungen**

6.3.1 Aufgabenstellungen für die Arbeitsgruppen

6.3.2 Versuchsanleitungen

6.3.3 Fragestellungen zur Lernerfolgssicherung

6.3.4 Berechnungen zur Siedlung

### **6.4 Literaturangaben**



## **6.1 Erklärung des Prüflings der selbstständigen Verfassung der Arbeit**

Ich versichere, dass ich die Arbeit selbstständig verfasst habe und keine anderen Hilfsmittel als die angegebenen Quellen und Hilfsmittel benutzt wurden. Ferner versichere ich, dass alle Stellen der Arbeit, die wörtlich oder sinngemäß aus anderen Quellen übernommen wurden, als solche kenntlich gemacht sind. Zudem versichere ich, dass die Arbeit in gleicher oder ähnlicher Form noch keiner Prüfungsbehörde vorgelegen hat.

---

Ort

Datum

Unterschrift

## 6.2 Aufgabenstellung der Bachelorarbeit

### **Gestaltung eines Konzepts für Blended Learning im Fachgymnasium, dargestellt an einem Versuch zur Brennstoffzelle**

Die Berufsbildenden Schulen 6 der Region Hannover (BBS 6) entwickeln ein Innovationszentrum für alternative Fahrzeugantriebe. Hierfür werden umfangreiche Laborausstattungen, u.a. zur Brennstoffzellentechnik beschafft.

Zudem kommt diesem Lerngegenstand in naher Zukunft eine hohe Bedeutung innerhalb der allgemeinen und der beruflichen Bildung zu.

Die BBS 6 haben Schülerarbeitskoffer beschafft, die im Unterricht eingesetzt werden sollen. Sie sind in erster Linie für den Unterricht in allgemeinbildenden Schulen konzipiert, nicht für den in einer Berufsschule. Aussagen über erprobte Lernsituationen stehen nicht zur Verfügung.

Für den Unterricht im Fachgymnasium ist ein Versuch/ eine Versuchsreihe zu entwickeln, mit deren Hilfe die Schülerinnen und Schüler den Aufbau und die Funktion einer Brennstoffzelle erlernen können. Die Schüler sollen den Einfluss ausgewählter Parameter auf die Leistung der Brennstoffzelle untersuchen können. Zudem sollen ausgewählte übergreifende Ziele und didaktische Grundsätze, die in den Rahmenrichtlinie der jeweiligen Schulform aufgeführt sind, berücksichtigt werden. Die Schüler erwerben zudem chemische und physikalische Kenntnisse, die dem Versuch zur Brennstoffzelle zugrunde liegen und das Verständnis des Aufbaus, der Funktion und Wirkungsweise von Brennstoffzellen in Fahrzeugen ermöglichen.

Der Versuch/ die Versuchsreihe soll prototypisch entwickelt werden. Zu entwickeln sind Medien für einen selbstgesteuerten Unterricht, die bereits im Rahmen der Arbeit oder zu einem späteren Zeitpunkt den Schülern netzbasiert zur Verfügung stehen können.

Im Rahmen der Hausarbeit sind die Grundlagen des Versuches zu dokumentieren. Die Lernsituation ist im Hinblick auf ihre didaktischen und methodischen Entscheidungen darzustellen und zu begründen.

Vorgehensweise und Ergebnisse des Vorhabens sind in der Lehrveranstaltung *Fachdidaktisches Colloquium* des *Zentrum für Didaktik der Technik* sowie in Veranstaltungen der Berufsbildenden Schule zu präsentieren.

Hannover, den 02.06.2010

Andreas Weiner  
Akad. Oberrat  
Zentrum für Didaktik der Technik – Leibniz Universität Hannover

## **6.3 Entwickelte Lernmaterialien und ergänzende Anmerkungen**

### **6.3.1 Aufgabenstellungen für die Arbeitsgruppen**

#### **Arbeitsgruppe 1: Gewinnung von elektrischem Strom mit Solarzellen**

Erklären Sie das Prinzip der Gewinnung von elektrischem Strom mittels Solarzellen. Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Geben Sie die energetische Eingangs- und Ausgangsgröße von Solarzellen an. Wie erfolgt dabei die energetische Umwandlung? Nehmen Sie an dieser Stelle auch Bezug auf den photovoltaischen Effekt.
2. Nennen Sie verschiedene Arten von Solarzellen. Welches Grundmaterial wird für die Solarzellen üblicherweise verwendet?
3. Wie wird der Wirkungsgrad von Solarzellen berechnet? Geben Sie typische energetische Eingangs- und Ausgangsgrößen an und nennen Sie die erreichbaren Wirkungsgrade verschiedener Solarzellenarten.
4. Formulieren Sie die Bedeutung von Solarzellen innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

Nutzen Sie für Ihre Präsentation auch Grafiken zur Veranschaulichung des Sachverhalts.

#### **Arbeitsgruppe 2: Gewinnung von elektrischem Strom mit Windkraftanlagen**

Erklären Sie das Prinzip der Gewinnung von elektrischem Strom mittels Windkraftanlagen. Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Geben Sie die energetische Eingangs- und Ausgangsgröße von Windkraftanlagen an. Wie erfolgt dabei die energetische Umwandlung? Nennen Sie hierfür die einzelnen Umwandlungsprozesse und nehmen Sie an dieser Stelle auch Bezug auf das elektrodynamische Prinzip der Stromerzeugung.
2. Wie wird der Wirkungsgrad von Windkraftanlagen berechnet? Geben Sie typische energetische Eingangs- und Ausgangsgrößen an und nennen Sie den erreichbaren Wirkungsgrad.
3. Formulieren Sie die Bedeutung von Windkraftanlagen innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

Nutzen Sie für Ihre Präsentation auch Grafiken zur Veranschaulichung des Sachverhalts.

### Arbeitsgruppe 3: Gewinnung von elektrischem Strom mit Wasserkraftwerken

Erklären Sie das Prinzip der Gewinnung von elektrischem Strom mittels Wasserkraftwerken.

Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Geben Sie die energetische Eingangs- und Ausgangsgröße von Wasserkraftwerken an. Wie erfolgt dabei die energetische Umwandlung? Nennen Sie hierfür die einzelnen Umwandlungsprozesse und nehmen Sie an dieser Stelle auch Bezug auf das elektrodynamische Prinzip der Stromerzeugung.
2. Wie wird der Wirkungsgrad von Wasserkraftwerken berechnet? Geben Sie typische energetische Eingangs- und Ausgangsgrößen an und nennen Sie den erreichbaren Wirkungsgrad.
3. Formulieren Sie die Bedeutung von Wasserkraftwerken innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

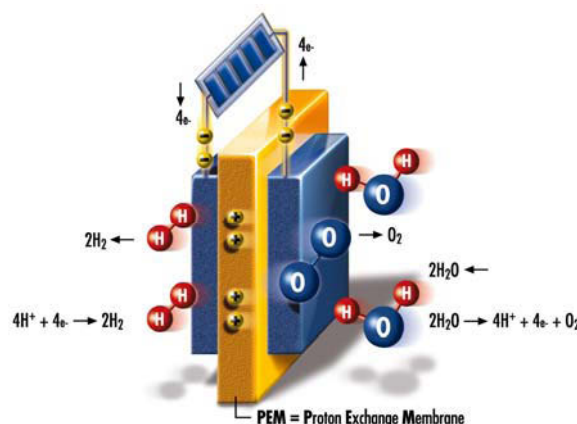
Nutzen Sie für Ihre Präsentation auch Grafiken zur Veranschaulichung des Sachverhalts.

### Arbeitsgruppe 4: Funktionsweise der Elektrolyse

Erklären Sie das Prinzip der Elektrolyse.

Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Worauf basiert die Elektrolyse? Nennen Sie wichtige Grundvoraussetzungen.
2. Geben Sie die energetische Eingangs- und Ausgangsgröße eines Elektrolyseurs an. Wie lautet die chemische Reaktion bei der Elektrolyse?
3. Beschreiben Sie den Aufbau eines Elektrolyseurs und beziehen Sie sich dabei auf die unten dargestellte Abbildung.



4. Formulieren Sie die Bedeutung des Elektrolyseurs innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

## Arbeitsgruppe 5: Eigenschaften von Wasserstoff

Nennen Sie zentrale Eigenschaften des Wasserstoffs.

Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Welche atomaren, physikalischen und chemischen Eigenschaften weist Wasserstoff auf?
2. Welche Problematik ergibt hinsichtlich der Energiedichte?
3. Welchen zentralen Vorteil hat Wasserstoff gegenüber konventionellen Energieträgern wie Benzin oder Kohle?
4. Nennen Sie neben der Elektrolyse weitere Verfahren zur Herstellung von Wasserstoff.
5. Nennen Sie drei Möglichkeiten der Wasserstoffspeicherung.
6. Formulieren Sie die Bedeutung des Wasserstoffs innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

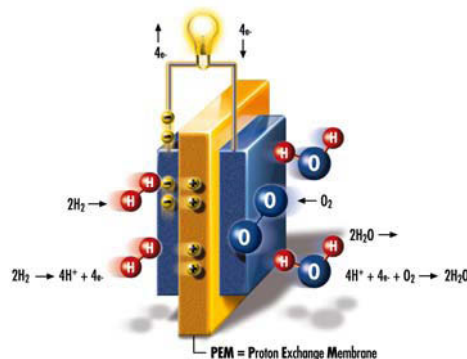
Nutzen Sie für Ihre Präsentation auch Grafiken zur Veranschaulichung des Sachverhalts.

## Arbeitsgruppe 6: Funktionsweise der Brennstoffzelle

Erklären Sie das Prinzip der Brennstoffzelle.

Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Geben Sie die energetische Eingangs- und Ausgangsgröße einer Brennstoffzelle an. Welcher energetische Umwandlungsprozess erfolgt dabei? Wie lautet die chemische Reaktion, die in der Brennstoffzelle abläuft?
2. Beschreiben Sie den Aufbau einer Brennstoffzelle. Woraus besteht der Katalysator und wozu wird er eingesetzt? Beziehen Sie sich an dieser Stelle auf die unten dargestellte Abbildung.



3. Welche Spannungen und Stromdichten lassen sich mit einer Brennstoffzelle in der Praxis realisieren?
4. Formulieren Sie die Bedeutung der Brennstoffzelle innerhalb einer nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft.

## Arbeitsgruppe 7: Die Brennstoffzelle in der Fahrzeugtechnik und der Hausenergieversorgung

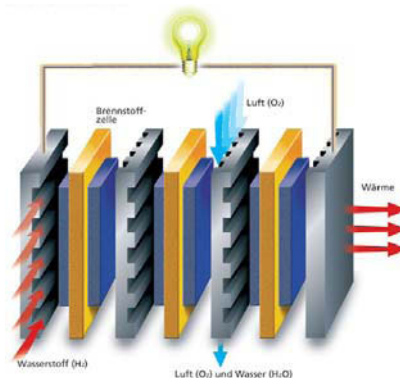
Erklären Sie die Funktionsweise von Brennstoffzellen in praktischen Anwendungen.

Berücksichtigen Sie in Ihrer Präsentation folgende Leitfragen:

1. Was ist unter einem Brennstoffzellen-System zu verstehen? Nennen Sie die einzelnen Komponenten und erklären Sie deren Wirkungsweise innerhalb des Systems. Beziehen Sie sich dabei auf die unten dargestellte Abbildung.



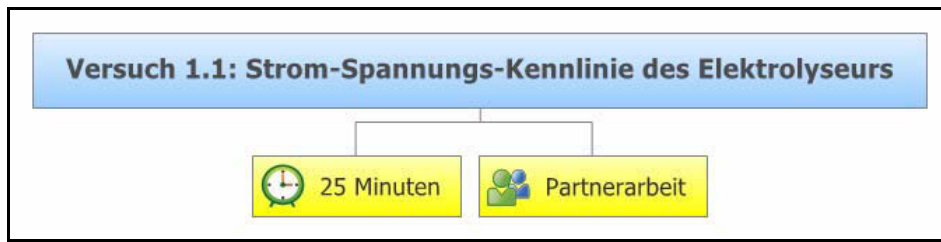
2. Beschreiben Sie den Aufbau und die Funktion eines Brennstoffzellen-Stacks. Durch welche beiden technischen Möglichkeiten kann die Leistungsabgabe eines Stacks beeinflusst werden? Beziehen Sie sich bei Ihren Erläuterungen auf die unten dargestellte Abbildung.



3. Zeigen Sie die Verwendung der Brennstoffzellentechnologie in der Fahrzeugtechnik auf. Welche Maßnahmen sind erforderlich, um mit brennstoffzellenbetriebenen Fahrzeugen große Reichweiten erzielen zu können?
4. Erläutern Sie, wie die Brennstoffzellentechnologie in die Hausenergieversorgung implementiert werden kann. Welcher große Vorteil ergibt sich dabei aus energetischer Sichtweise?
5. Nennen Sie allgemeine Vor- und Nachteile der Brennstoffzellentechnologie.

Nutzen Sie für Ihre Präsentation auch weitere Grafiken zur Veranschaulichung des Sachverhalts.

## 6.3.2 Versuchsanleitungen



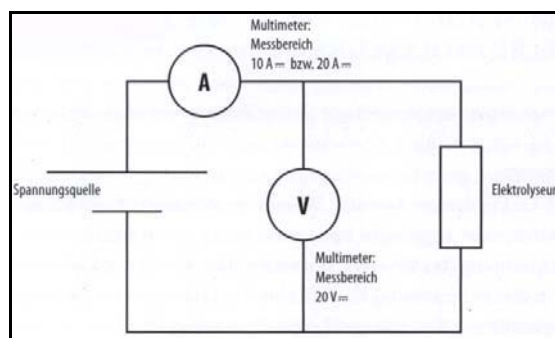
### I) Hintergrundinformationen

Der Elektrolyseur zersetzt beim Anlegen einer Spannung Wasser in seine Bestandteile Wasserstoff und Sauerstoff. Die angelegte Spannung muss mindestens die theoretische Zersetzungsspannung von Wasser ( $U_z = 1,23 \text{ V}$ ) erreichen, damit eine Zersetzung erfolgen kann. In der Praxis ist aufgrund von Verlusten eine höhere angelegte Spannung erforderlich. In diesem Versuch wird über die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs die Zersetzungsspannung des Wassers ermittelt.

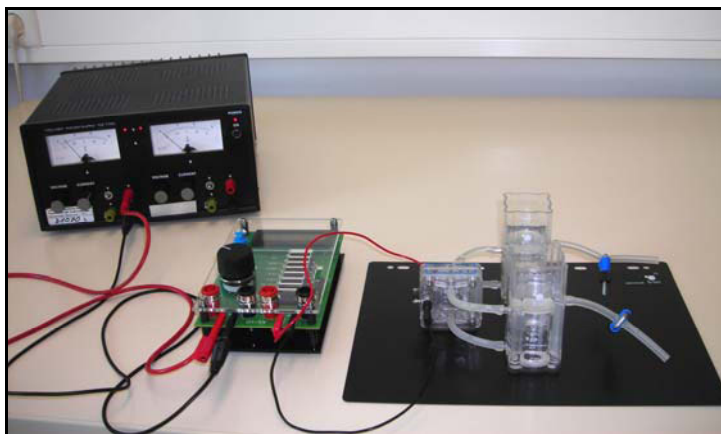
### II) Material

- Grundplatte
- Elektrolyseur
- 2 Gasspeicher
- Multimeter
- Spannungsquelle (Labornetzgerät)
- Destilliertes Wasser
- 2 Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz)
- 6 Schläuche (4x 6 cm, 2x 9 cm)
- 2 Schlauchklemmen

### III) Schaltbild und Aufbau des Versuchs



Versuch 1.1: Schaltbild



Versuch 1.1: Aufbau

#### IV) Anleitung

1. Setzen Sie die zwei Gasspeicher und den Elektrolyseur auf die Grundplatte. Verbinden Sie die Anschlüsse auf der Elektrolyseurseite der Gasspeicher über vier Schläuche (je 6 cm Länge) mit den Anschlüssen am Elektrolyseur. Befestigen Sie an der Brennstoffzellenseite beider Gasspeicher einen Schlauch (je 9 cm Länge) und verschließen Sie diesen mit einer Schlauchklemme.
2. Befüllen Sie beide Gasspeicher bis zur oberen Markierung der Ausgleichsbehälter mit destilliertem Wasser. Öffnen Sie die Schlauchklemmen an der Brennstoffzellenseite der Gasspeicher, um Luft aus dem Elektrolyseur und den Gasspeichern entweichen lassen zu können. Verschließen Sie die Schlauchklemmen wieder, wenn der Wasserstand in den Gasspeichern nicht mehr sinkt.
3. Verbinden Sie gemäß dem Schaltbild über die Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz) den Elektrolyseur mit dem Multimeter.
4. Verbinden Sie gemäß dem Schaltbild das Labornetzgerät mit dem Multimeter.
5. Schalten Sie das Labornetzgerät ein und stellen Sie die Spannung in 0,1-Volt-Schritten von 0 Volt bis 2 Volt höher. Stellen Sie keine Spannungen über 2 Volt ein, um eine Beschädigung des Elektrolyseurs zu vermeiden! Warten Sie zwischen den Messungen einen Augenblick, damit sich die Werte stabilisieren können. Notieren Sie in der untenstehenden Tabelle die vom Multimeter ausgegebenen Stromstärkewerte. Runden Sie auf zwei Stellen nach dem Komma.



$U$ [V]	$I$ [A]
0,1	
0,2	
0,3	
0,4	
0,5	
0,6	
0,7	
0,8	
0,9	
1,0	
1,1	
1,2	
1,3	
1,4	
1,5	
1,6	
1,7	
1,8	
1,9	
2,0	

6. a) Stellen Sie mithilfe der Tabellenwerte die Strom-Spannungs-Kennlinie des Elektrolyseurs in einem Diagramm dar. Auf der x-Achse ist die Spannung  $U$  [V], auf der y-Achse die Stromstärke  $I$  [A] einzutragen.



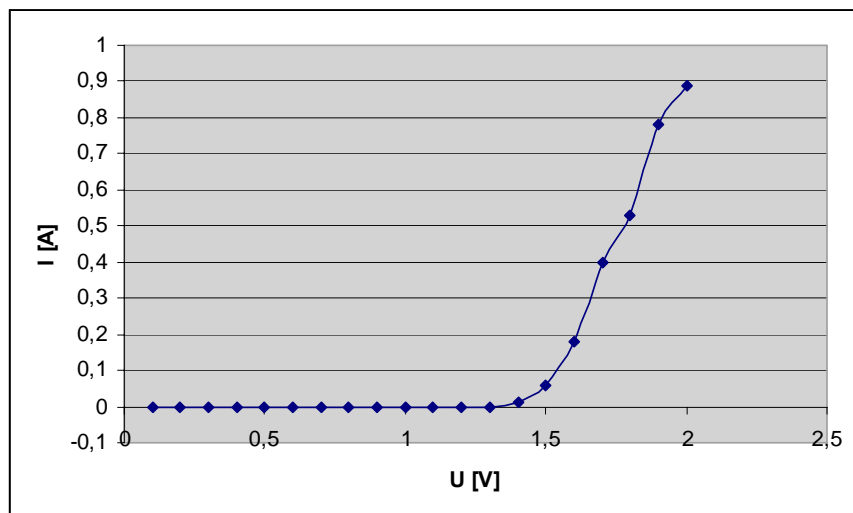
- b) Die im Versuch ermittelte Zersetzungsspannung von Wasser beträgt  $U_z = \underline{\hspace{2cm}}$ .

### Versuch 1.1: Musterlösung für die Lehrkraft

5.

$U$ [V]	$I$ [A]
0,1	0,00
0,2	0,00
0,3	0,00
0,4	0,00
0,5	0,00
0,6	0,00
0,7	0,00
0,8	0,00
0,9	0,00
1,0	0,00
1,1	0,00
1,2	0,00
1,3	0,00
1,4	0,01
1,5	0,06
1,6	0,18
1,7	0,40
1,8	0,53
1,9	0,78
2,0	0,89

6. a)



6. b) Die im Versuch ermittelte Zersetzungsspannung von Wasser beträgt  $U_z = \underline{1,4 \text{ V}}$ .



## I) Hintergrundinformationen

Im Elektrolyseur wird ein Teil der zugeführten elektrischen Energie in Nutzenergie in Form des Energieträgers Wasserstoff umgewandelt. Der Heizwert von Wasserstoff  $H_{H_2}$  gibt an, welche Menge an Energie bei einer Verbrennung von  $1 \text{ m}^3$  Wasserstoff genutzt werden kann. Zur Bestimmung des Wirkungsgrads des Elektrolyseurs sind folgende Kennwerte und Formeln bekannt:

Wirkungsgrad  $\eta$ : 
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} = \frac{E_{Wasserstoff}}{E_{elektrisch}}$$

Nutzenergie: 
$$E_{ab} = E_{Wasserstoff} = V_{H_2} \cdot H_{H_2}$$

Zugeführte Energie: 
$$E_{zu} = E_{elektrisch} = U^* \cdot I^* \cdot t$$

Anmerkungen: 
$$U^* \triangleq \text{Mittelwert der Spannung}$$

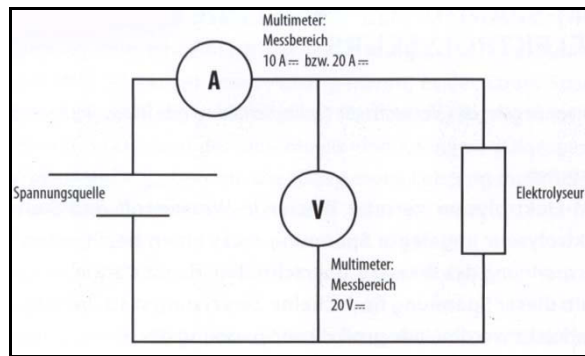
$$I^* \triangleq \text{Mittelwert der Stromstärke}$$

Heizwert  $H_{H_2} = 10,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 3,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$

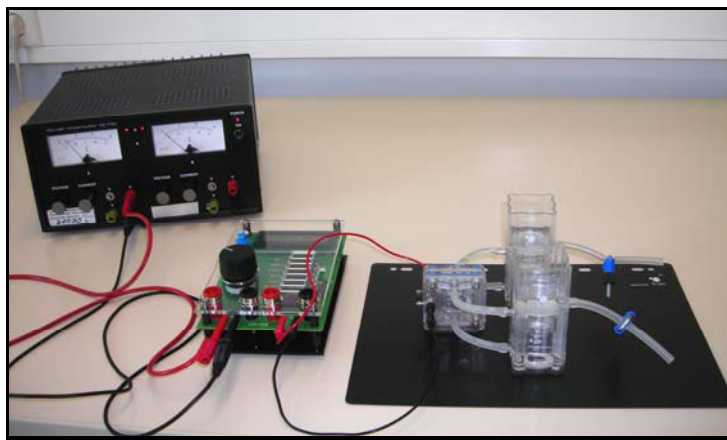
## II) Material

- Grundplatte
- Elektrolyseur
- 2 Gasspeicher
- Multimeter
- Spannungsquelle (Labornetzgerät)
- Destilliertes Wasser
- 2 Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz)
- 6 Schläuche (4x 6 cm, 2x 9 cm)
- 2 Schlauchklemmen

### III) Schaltbild und Aufbau des Versuchs



Versuch 1.2: Schaltbild



Versuch 1.2: Aufbau

### IV) Anleitung

1. Setzen Sie die zwei Gasspeicher und den Elektrolyseur auf die Grundplatte. Verbinden Sie die Anschlüsse auf der Elektrolyseurseite der Gasspeicher über vier Schläuche (je 6 cm Länge) mit den Anschlüssen am Elektrolyseur. Befestigen Sie an der Brennstoffzellenseite beider Gasspeicher einen Schlauch (je 9 cm Länge) und verschließen Sie diesen mit einer Schlauchklemme.
2. Befüllen Sie beide Gasspeicher bis zur oberen Markierung der Ausgleichsbehälter mit destilliertem Wasser. Öffnen Sie die Schlauchklemmen an der Brennstoffzellenseite der Gasspeicher, um Luft aus dem Elektrolyseur und den Gasspeichern entweichen lassen zu können. Verschließen Sie die Schlauchklemmen wieder, wenn der Wasserstand in den Gasspeichern nicht mehr sinkt.
3. Verbinden Sie gemäß dem Schaltbild über die Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz) den Elektrolyseur mit dem Multimeter.

4. Schalten Sie das Labornetzgerät ein und wählen Sie eine Spannung zwischen 1,5 V und 2,0 V.
6. Starten Sie die Zeitmessung, wenn Sie das Labornetzgerät mit dem Multimeter verbinden und die sofortige Wasserstoffproduktion im Elektrolyseur beginnt. Tragen Sie in die untenstehende Tabelle die Werte für die Zeit  $t$  [s], die Spannung  $U$  [V] und die Stromstärke  $I$  [A] jeweils dann ein, wenn das produzierte Wasserstoffvolumen  $V_{H_2}$  0 cm<sup>3</sup>, 5 cm<sup>3</sup>, 10 cm<sup>3</sup>, 15 cm<sup>3</sup>, 20 cm<sup>3</sup>, 25 cm<sup>3</sup> und 30 cm<sup>3</sup> beträgt. Runden Sie die vom Multimeter ausgegebenen Spannungs- und Stromstärkewerte auf zwei Stellen nach dem Komma.

$V_{H_2}$ [cm <sup>3</sup> ]	$t$ [s]	$U$ [V]	$I$ [A]
0			
5			
10			
15			
20			
25			
30			

7. Berechnen Sie den Wirkungsgrad des Elektrolyseurs. Nutzen Sie hierfür die angegebenen Kennwerte und Formeln sowie Ihre Tabellenwerte. Runden Sie auf zwei Stellen nach dem Komma.

## Versuch 1.2: Musterlösung für die Lehrkraft

6.

$V_{H_2} [\text{cm}^3]$	$t [\text{s}]$	$U [\text{V}]$	$I [\text{A}]$
0	0	1,83	0,73
5	45	1,83	0,73
10	95	1,83	0,73
15	150	1,84	0,73
20	205	1,83	0,72
25	265	1,83	0,73
30	310	1,83	0,73

7.

$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} = \frac{E_{\text{Wasserstoff}}}{E_{\text{elektrisch}}} = \frac{V_{H_2} \cdot H_{H_2}}{U^* \cdot I^* \cdot t} = \frac{30 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 10,8 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}}{1,83 \text{ V} \cdot 0,73 \text{ A} \cdot 310 \text{ s}} = 0,78$$

= 78%

## Versuch 2.1: Strom-Spannungs-Kennlinie und Leistungskurve der Brennstoffzelle



40 Minuten



Partnerarbeit

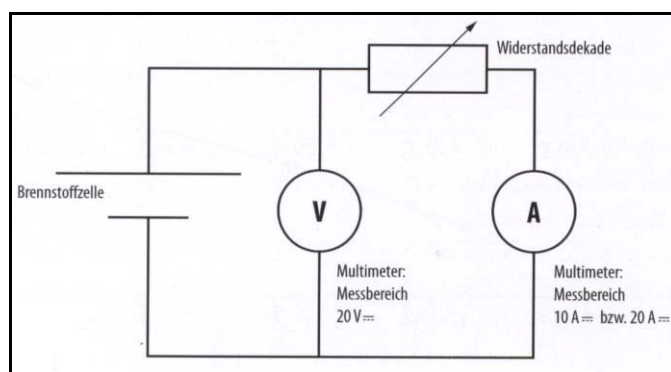
### I) Hintergrundinformationen

In der Brennstoffzelle reagieren der zuvor produzierte Wasserstoff und Sauerstoff zu Wasser. Dabei wird Energie in Form von elektrischem Strom frei. Im folgenden Versuch wird die maximale Nutzleistung der Brennstoffzelle bestimmt.

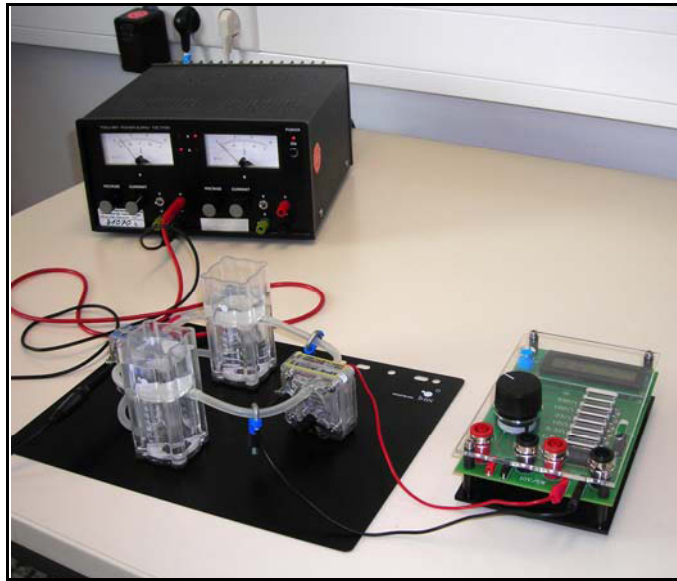
### II) Material

- Grundplatte
- Elektrolyseur
- Brennstoffzelle
- 2 Gasspeicher
- Multimeter mit Widerstandsdekade
- Spannungsquelle (Labornetzgerät)
- Destilliertes Wasser
- 2 Verschlusskappen
- 2 Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz)
- 6 Schläuche (4x 6 cm, 2x 9 cm)
- 2 Schlauchklemmen

### III) Schaltbild und Aufbau des Versuchs



Versuch 2.1: Schaltbild



Versuch 2.1: Aufbau

#### IV) Anleitung

1. Setzen Sie die zwei Gasspeicher und den Elektrolyseur auf die Grundplatte. Verbinden Sie die Anschlüsse auf der Elektrolyseurseite der Gasspeicher über vier Schläuche (je 6 cm Länge) mit den Anschlüssen am Elektrolyseur. Befestigen Sie an der Brennstoffzellenseite beider Gasspeicher einen Schlauch (je 9 cm Länge) und verschließen Sie diese mit jeweils einer Schlauchklemme.
2. Befüllen Sie beide Gasspeicher bis zur oberen Markierung der Ausgleichsbehälter mit destilliertem Wasser. Öffnen Sie die Schlauchklemmen an der Brennstoffzellenseite der Gasspeicher, um Luft aus dem Elektrolyseur und den Gasspeichern entweichen lassen zu können.
3. Setzen Sie die Brennstoffzelle auf die Grundplatte und verschließen Sie die beiden unteren Anschlüsse mit einer Verschlusskappe. An den beiden oberen Anschlüssen der Brennstoffzelle werden die bereits am Gasspeicher befestigten Schläuche (je 9 cm Länge) aufgesteckt.
4. Verbinden Sie gemäß dem Schaltbild über die Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz) die Brennstoffzelle mit dem Multimeter mit Widerstandsdekade und stellen Sie die Leerlaufspannung ( $R = \infty$ ) ein.
5. Schalten Sie das Labornetzgerät ein und wählen Sie eine Spannung zwischen 1,5 V und 2,0 V.
6. Verbinden Sie das Labornetzgerät mit dem Elektrolyseur und produzieren Sie zunächst 20 cm<sup>3</sup> Wasserstoff und 10 cm<sup>3</sup> Sauerstoff. Schalten Sie anschließend das Labornetzgerät wieder aus.



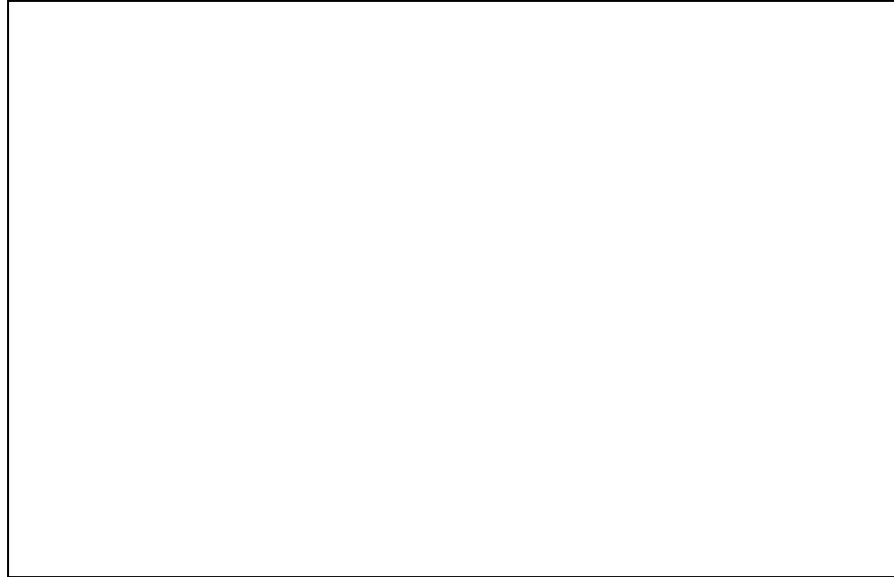
7. Öffnen Sie kurz die beiden Verschlusskappen an den unteren Anschlüssen der Brennstoffzelle, damit der produzierte Wasserstoff und Sauerstoff in die Zelle einströmen kann.
8. Beginnend mit der Leerlaufspannung ( $R = \infty$ ) wird nun an dem Multimeter mit Widerstandsdekade zu den kleineren Widerständen durchgeschaltet. Tragen Sie die Werte der Spannung  $U$  [V] und der Stromstärke  $I$  [A] in die untenstehende Tabelle ein und berechnen Sie die abgegebene Leistung  $P$  [W]. Runden Sie auf zwei Stellen nach dem Komma.

$R$ [ $\Omega$ ]	$U$ [V]	$I$ [A]	$P$ [W]
$\infty$			
330			
100			
33			
10			
3,3			
1,0			
0,33			
0,1			
0			

9. a) Stellen Sie mithilfe der Tabellenwerte die Strom-Spannungs-Kennlinie der Brennstoffzelle in einem Diagramm dar. Auf der x-Achse ist die Stromstärke  $I$  [A], auf der y-Achse die Spannung  $U$  [V] einzutragen.



- b) Stellen Sie mithilfe der Tabellenwerte die Leistungskurve der Brennstoffzelle in Abhängigkeit der Stromstärke in einem Diagramm dar. Auf der x-Achse ist die Stromstärke  $I$  [A], auf der y-Achse die Leistung  $P$  [W] einzutragen.



- c) Die maximale Nutzleistung der Brennstoffzelle beträgt

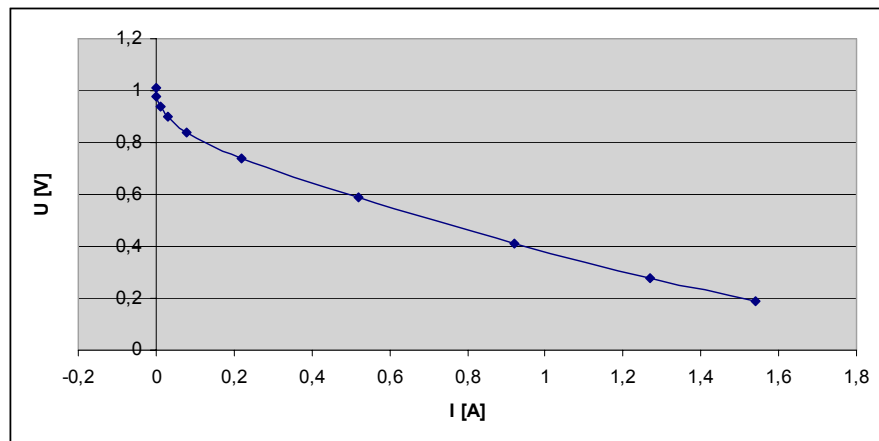
$$P_{ab} = P_{elektrisch} = \underline{\hspace{2cm}}.$$

## Versuch 2.1: Musterlösung für die Lehrkraft

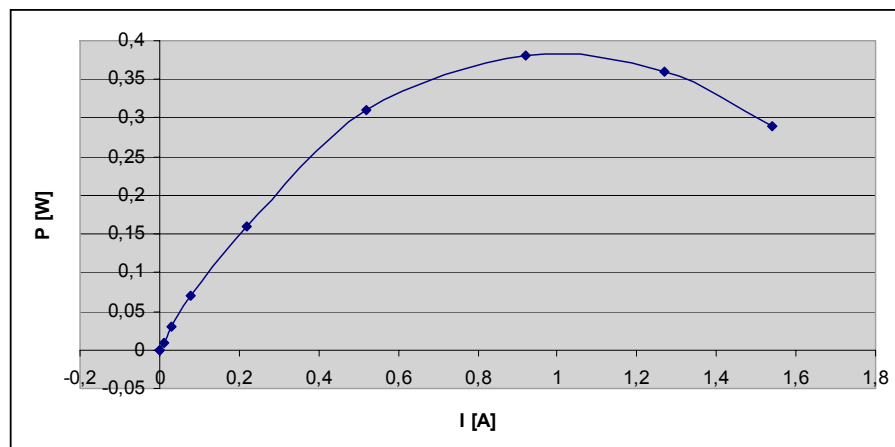
8.

$R [\Omega]$	$U [V]$	$I [A]$	$P [W]$
$\infty$	1,01	0,00	0,00
330	0,98	0,00	0,00
100	0,94	0,01	0,01
33	0,90	0,03	0,03
10	0,84	0,08	0,07
3,3	0,74	0,22	0,16
1,0	0,59	0,52	0,31
0,33	0,41	0,92	0,38
0,1	0,28	1,27	0,36
0	0,19	1,54	0,29

9. a)



9. b)



9. c) Die maximale Nutzleistung der Brennstoffzelle beträgt

$$P_{ab} = P_{\text{elektrisch}} = \underline{0.38W}.$$



## I) Hintergrundinformationen

Der Wirkungsgrad  $\eta$  ist allgemein definiert als das Verhältnis von der Nutzleistung  $P_{ab}$  zu der zugeführten Leistung  $P_{zu}$ .  $\eta$  gibt dabei an, wie viel der zugeführten Energie  $E_{zu}$  als tatsächlich nutzbare Energie  $E_{ab}$  von einem technischen System abgegeben wird. Die nicht nutzbare Leistung wird als Verlustleistung bezeichnet und errechnet sich aus der Differenz der zugeführten und der nutzbaren Leistung. Der Wirkungsgrad  $\eta$  liefert eine Aussage über die Effizienz von Energiewandlern und kann Werte zwischen 0 und 1 oder in prozentualer Schreibweise Werte zwischen 0 % und 100 % annehmen. Je größer der Wirkungsgrad, desto effizienter ist das technische System. Im folgenden Versuch wird der Wirkungsgrad der Brennstoffzelle bestimmt. Die benötigten Größen zur Berechnung der zugeführten Energie (Wasserstoff) und der Nutzenergie (elektrischer Strom) liefert die Versuchsauswertung. Verwenden Sie zur Ermittlung des Wirkungsgrads folgende Formeln und Kennwerte:

Wirkungsgrad  $\eta$ : 
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} = \frac{E_{elektrisch}}{E_{Wasserstoff}}$$

Nutzenergie: 
$$E_{ab} = E_{elektrisch} = U^* \cdot I^* \cdot t$$

Zugeführte Energie: 
$$E_{zu} = E_{Wasserstoff} = V_{H_2} \cdot H_{H_2}$$

Anmerkungen: 
$$U^* \triangleq \text{Mittelwert der Spannung}$$

$$I^* \triangleq \text{Mittelwert der Stromstärke}$$

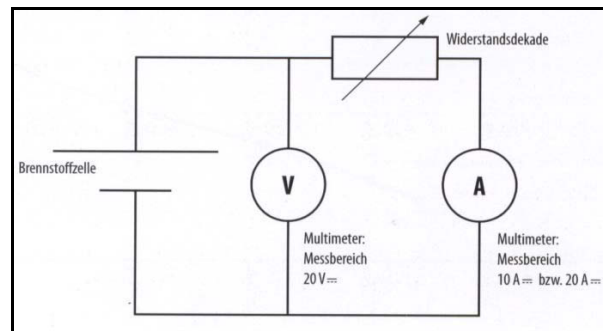
Heizwert  $H_{H_2} = 10,8 \frac{\text{MJ}}{\text{m}^3} = 3,0 \frac{\text{kWh}}{\text{m}^3}$

Der Heizwert von Wasserstoff  $H_{H_2}$  gibt an, welche Menge an Energie bei einer Verbrennung von 1 m<sup>3</sup> Wasserstoff genutzt werden kann.

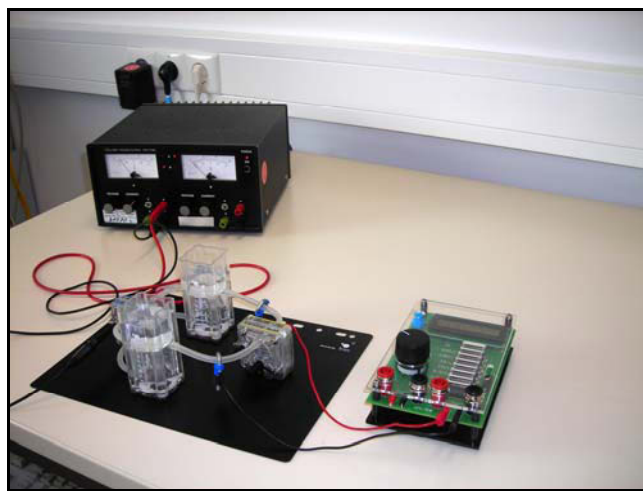
## II) Material

- Grundplatte
- Elektrolyseur
- Brennstoffzelle
- 2 Gasspeicher
- Multimeter mit Widerstandsdekade
- Spannungsquelle (Labornetzgerät)
- Fahrzeug mit Elektromotor
- Destilliertes Wasser
- 2 Verschlusskappen
- 2 Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz)
- 6 Schläuche (4x 6 cm, 2x 9 cm)
- 2 Schlauchklemmen

## III) Schaltbild und Aufbau des Versuchs



Versuch 2.2: Schaltbild



Versuch 2.2: Aufbau

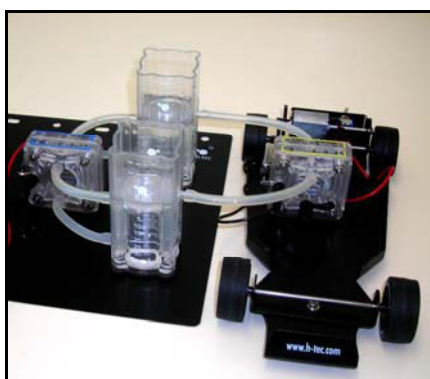
#### IV) Anleitung

1. Setzen Sie die zwei Gasspeicher und den Elektrolyseur auf die Grundplatte. Verbinden Sie die Anschlüsse auf der Elektrolyseurseite der Gasspeicher über vier Schläuche (je 6 cm Länge) mit den Anschlüssen am Elektrolyseur. Befestigen Sie an der Brennstoffzellenseite beider Gasspeicher einen Schlauch (je 9 cm Länge) und verschließen Sie diese mit jeweils einer Schlauchklemme.
2. Befüllen Sie beide Gasspeicher bis zur oberen Markierung der Ausgleichsbehälter mit destilliertem Wasser. Öffnen Sie die Schlauchklemmen an der Brennstoffzellenseite der Gasspeicher, um Luft aus dem Elektrolyseur und den Gasspeichern entweichen lassen zu können.
3. Setzen Sie die Brennstoffzelle auf die Grundplatte und verschließen Sie die beiden unteren Anschlüsse mit einer Verschlusskappe. An den beiden oberen Anschlüssen der Brennstoffzelle werden die bereits am Gasspeicher befestigten Schläuche (je 9 cm Länge) aufgesteckt.
4. Schalten Sie das Labornetzgerät ein und wählen Sie eine Spannung zwischen 1,5 V und 2,0 V.
5. Verbinden Sie das Labornetzgerät mit dem Elektrolyseur und produzieren Sie 20 cm<sup>3</sup> Wasserstoff. Schalten Sie anschließend das Labornetzgerät wieder aus.
6. Wählen Sie am Multimeter mit Widerstandsdekade einen Widerstand, der während des Versuchs nicht mehr verändert wird (z.B.  $R = 3,3 \, \Omega$ ).
7. Starten Sie die Zeitmessung, wenn Sie über die Verbindungskabel (1 rot, 1 schwarz) die Brennstoffzelle mit dem Multimeter mit Widerstandsdekade verbinden. Tragen Sie in die untenstehende Tabelle die Werte für die Zeit  $t$  [s], die Spannung  $U$  [V] und die Stromstärke  $I$  [A] jeweils dann ein, wenn das Wasserstoffvolumen 20 cm<sup>3</sup>, 15 cm<sup>3</sup>, 10 cm<sup>3</sup>, 5 cm<sup>3</sup>, und 0 cm<sup>3</sup> beträgt. Runden Sie die vom Multimeter mit Widerstandsdekade ausgegebenen Spannungs- und Stromstärkewerte auf zwei Stellen nach dem Komma.

$V_{H_2}$ [cm <sup>3</sup> ]	$t$ [s]	$U$ [V]	$I$ [A]
20			
15			
10			
5			
0			

8. Berechnen Sie den Wirkungsgrad der Brennstoffzelle. Nutzen Sie hierfür die angegebenen Kennwerte und Formeln sowie Ihre Tabellenwerte. Runden Sie auf zwei Stellen nach dem Komma.

9. Zum Abschluss der Versuchsreihe können Sie nun einen Verbraucher, zum Beispiel das Fahrzeug mit Elektromotor, an die Brennstoffzelle anschließen. Entfernen Sie hierfür das Multimeter mit Widerstandsdekade und verbinden Sie die beiden Kabel des Motors (1 rot, 1 schwarz) mit der Brennstoffzelle. Heben Sie die Hinterachse des Fahrzeugs an und legen Sie den Schalter von *Off* auf *On* um.



Die Energie des Wasserstoffs wird nun von der Brennstoffzelle in elektrische Energie umgewandelt und versetzt über den Elektromotor die Antriebsachse in Rotation. Auf diese Weise ist eine Versorgung jeglicher elektrischer Verbraucher mit einer Brennstoffzelle möglich.

## Versuch 2.2: Musterlösung für die Lehrkraft

(Gewählter Widerstand:  $R = 3,3 \, \Omega$ )

7.

$V_{H_2} [\text{cm}^3]$	$t [\text{s}]$	$U [\text{V}]$	$I [\text{A}]$
20	0	0,74	0,21
15	170	0,73	0,21
10	344	0,72	0,21
5	517	0,72	0,21
0	693	0,71	0,21

8. 
$$\eta = \frac{P_{ab}}{P_{zu}} = \frac{E_{ab}}{E_{zu}} = \frac{E_{elektrisch}}{E_{Wasserstoff}} = \frac{U^* \cdot I^* \cdot t}{V_{H_2} \cdot H_{H_2}} = \frac{0,72 \text{ V} \cdot 0,21 \text{ A} \cdot 693 \text{ s}}{20 \cdot 10^{-6} \text{ m}^3 \cdot 10,8 \cdot 10^6 \frac{\text{J}}{\text{m}^3}} = 0,49$$

= 49 %



### 6.3.3 Fragestellungen zur Lernerfolgssicherung

#### Überprüfung des gelernten Wissens Teil 1:

#### Allgemeine Grundlagen der Brennstoffzellentechnologie und der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft

1. Nennen Sie die Bedeutung der Brennstoffzellentechnologie für die Energiewirtschaft und beziehen Sie sich an dieser Stelle auf die Reichweite von konventionellen Energieträgern.
2. Formulieren Sie den Grundgedanken der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft. Beschreiben Sie einzelne Komponenten und ihre Wirkungsweise.
3. Welche regenerativen Energiequellen der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft sind Ihnen bekannt? Erklären Sie deren Bedeutung und das jeweilige Funktionsprinzip.
4. Welche Aufgabe übernimmt der Elektrolyseur? Geben Sie die ablaufende chemische Reaktion an und nennen Sie wichtige Voraussetzungen hierfür.
5. Geben Sie wesentliche Eigenschaften von Wasserstoff an und beschreiben Sie drei Möglichkeiten der Speicherung.
6. Erläutern Sie den Aufbau und das Funktionsprinzip der Brennstoffzelle. Formulieren Sie die ablaufende chemische Reaktion und nennen Sie Vor- und Nachteile dieser Technologie.
7. Zeigen Sie die praktische Anwendung der Brennstoffzellentechnologie in der Fahrzeugtechnik und der Hausenergieversorgung auf. Was verstehen Sie dabei unter einem Brennstoffzellen-Stack?

## Überprüfung des gelernten Wissens Teil 2:

### Berechnungen zur Auslegung von einzelnen Komponenten der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft

1. Die privaten Haushalte der 500-Einwohner-Siedlung haben einen Energiebedarf von 2325 kWh pro Tag. Zur Versorgung der Kraftfahrzeuge ist eine Energiemenge von 3690 kWh pro Tag erforderlich. Berechnen Sie den gesamten Energiebedarf.
2. Gehen Sie davon aus, dass tagsüber (6 Uhr - 22 Uhr) 90% und nachts (22 Uhr - 6 Uhr) 10% des gesamten Energiebedarfs benötigt werden. Ermitteln Sie auf dieser Basis die durchschnittliche benötigte Leistung.
3. Berechnen Sie, welche Leistung tagsüber von den regenerativen Energiequellen bereitzustellen ist, um eine durchgängige Versorgung sicherstellen zu können.
  - a) Mit welchem Volumenstrom an Wasserstoff müssen die Brennstoffzellen versorgt werden, um die erforderliche Leistung erbringen zu können?
  - b) Welche elektrische Leistung ist von den regenerativen Energiequellen zu erbringen, um den errechneten Volumenstrom gewährleisten zu können?
4. Auf Basis der Energievorschrift der Siedlung sind mittels Solarzellen 14 % der erforderlichen elektrischen Leistung zu decken. Berechnen Sie, welche Fläche A an Solarzellen hierfür benötigt wird. Gehen Sie davon aus, dass pro Quadratmeter Solarzellenfläche eine Leistungsabgabe von 800 Watt erzielt wird.
5. Auf Basis der Energievorschrift der Siedlung sind mittels eines kleinen Wasserkraftwerks 60 % der erforderlichen elektrischen Leistung zu decken. Berechnen Sie, wie groß die Fallhöhe h des Wassers auf die Turbine hierfür sein muss.

Gegebene Kennwerte:  $\dot{V}_{\text{Fluss}} = 40 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}$ ,  $\rho_{\text{Wasser}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$ ,  $g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$
6. Auf Basis der Energievorschrift der Siedlung sind mittels einer Windkraftanlage 26 % der erforderlichen elektrischen Leistung zu decken. Berechnen Sie, welche Länge die Rotorblätter der Windkraftanlage haben müssen.

Gegebene Kennwerte:  $v_{\text{Luft}} = 5 \frac{\text{m}}{\text{s}}$ ,  $\rho_{\text{Luft}} = 1,184 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$
7. Gehen Sie davon aus, dass die Solar- und Windkraftanlage nachts nicht genutzt werden kann. Lässt sich die erforderliche elektrische Leistung durch das kleine Wasserkraftwerk decken? Verfahren Sie analog zu dem vorherigen Rechenschema.

### 6.3.4 Berechnungen zur Siedlung

#### I) Berechnungen zum Energiebedarf der Siedlung

Bei den Berechnungen wird von einer Siedlung mit 500 Einwohnern ausgegangen. Der Kraftfahrzeugbestand wird auf 300 Autos festgelegt, die im Jahr eine durchschnittliche Laufleistung von jeweils 15.000 Kilometern haben. Als Grundlage für den Energiewert der privaten Haushalte ist die Seite 25 des Jahresberichts 2009 der *Arbeitsgemeinschaft Energiebilanzen* herangezogen worden:

<http://www.ag-energiebilanzen.de/viewpage.php?idpage=118>

Durch die Umrechnung des vorgegebenen Wertes, bezogen auf einen Tag und eine Person, und die anschließende Multiplikation mit der Einwohnerzahl von 500 ergibt sich die unten dargestellte Größe. Für die Kraftfahrzeuge wird der in Abbildung 2.3 aufgezeigte Energiebedarf von 30 kWh auf 100 km angesetzt. Pro Tag fährt ein Auto im Durchschnitt 41 km. Multipliziert mit der Autoanzahl von 300 ergibt sich eine tägliche zurückgelegte Strecke von 12300 km für alle Kraftfahrzeuge. Der Dreisatz liefert dann den dafür benötigten Energiebedarf.

Private Haushalte: 2325 kWh pro Tag

Verkehrssektor: 3690 kWh pro Tag

## II) Berechnungen zur Auslegung von einzelnen Komponenten der nachhaltigen Wasserstoffwirtschaft

(siehe auch 6.3.3 Fragestellungen zur Lernerfolgssicherung, Teil 2)

1. Die privaten Haushalte der 500-Einwohner-Siedlung haben einen Energiebedarf von 2325 kWh pro Tag. Zur Versorgung der Kraftfahrzeuge ist eine Energiemenge von 3690 kWh pro Tag erforderlich. Berechnen Sie den gesamten Energiebedarf pro Tag.

$$2325 \text{ kWh} + 3690 \text{ kWh} = 6015 \text{ kWh}$$

2. Gehen Sie davon aus, dass tagsüber (6 Uhr - 22 Uhr) 90% und nachts (22 Uhr - 6 Uhr) 10% des gesamten Energiebedarfs benötigt werden. Ermitteln Sie auf dieser Basis die durchschnittliche benötigte Leistung.

$$E_{\text{Tag}} = 0,90 \cdot 6015 \text{ kWh} = 5413,5 \text{ kWh} \quad (\text{tagsüber benötigte Energie})$$

$$P_{\text{Tag}} = \frac{E_{\text{Tag}}}{t_{\text{Tag}}} = \frac{5413,5 \text{ kWh}}{16 \text{ h}} = 338,34 \text{ kW} \quad (\text{tagsüber benötigte Leistung})$$

$$E_{\text{Nacht}} = 0,10 \cdot 6015 \text{ kWh} = 601,5 \text{ kWh} \quad (\text{nachts benötigte Energie})$$

$$P_{\text{Nacht}} = \frac{E_{\text{Nacht}}}{t_{\text{Nacht}}} = \frac{601,5 \text{ kWh}}{8 \text{ h}} = 75,19 \text{ kW} \quad (\text{nachts benötigte Leistung})$$

Anmerkungen: Leistung  $P = \frac{\text{Energie } E}{\text{Zeit } t}$

$$1 \text{ kWh} = 3,6 \text{ MJ}$$

$$1 \text{ h} = 3600 \text{ s}$$

$$\text{kWh} \triangleq \text{Kilowattstunde}$$

$$\text{MJ} \triangleq \text{Megajoule}$$

$$\text{h} \triangleq \text{Stunde}$$

$$\text{s} \triangleq \text{Sekunde}$$

3. Berechnen Sie, welche Leistung tagsüber von den regenerativen Energiequellen bereitzustellen ist, um eine durchgängige Versorgung sicherstellen zu können.
- a) Mit welchem Volumenstrom an Wasserstoff müssen die Brennstoffzellen versorgt werden, um die erforderliche Leistung erbringen zu können.

$$\text{Brennstoffzellen: } \eta_B = \frac{P_{B,ab}}{P_{B,zu}} = \frac{P_{B,elektrisch}}{P_{B,Wasserstoff}} = 49 \% \quad (\text{experimentell ermittelter Wert})$$

$$\text{mit } P_{B,Wasserstoff} = \dot{V}_{H_2} \cdot H_{H_2}$$

$$\text{mit } P_{B,elektrisch} = P_{Tag} = 338,34 \text{ kW}$$

$$\text{Umstellen und Einsetzen liefert: } \dot{V}_{H_2} = \frac{P_{B,elektrisch}}{H_{H_2} \cdot \eta_B} = 0,064 \frac{m^3}{s}$$

Anmerkungen:  $\eta_B \triangleq$  Wirkungsgrad der Brennstoffzellen

$$\dot{V}_{H_2} \triangleq \text{Volumenstrom Wasserstoff}$$

$$H_{H_2} \triangleq \text{Heizwert von Wasserstoff } (10,8 \frac{MJ}{m^3})$$

- b) Welche elektrische Leistung ist von den regenerativen Energiequellen zu erbringen, um den errechneten Volumenstrom gewährleisten zu können?

$$\text{Elektrolyseur: } \eta_E = \frac{P_{E,ab}}{P_{E,zu}} = \frac{P_{E,Wasserstoff}}{P_{E,elektrisch}} = 78 \% \quad (\text{experimentell ermittelter Wert})$$

$$\text{mit } P_{E,Wasserstoff} = \dot{V}_{H_2} \cdot H_{H_2}$$

$$\text{Umstellen und Einsetzen liefert: } P_{E,elektrisch} = \frac{\dot{V}_{H_2} \cdot H_{H_2}}{\eta_E} = 886,15 \text{ kW}$$

Anmerkungen:  $\eta_E \triangleq$  Wirkungsgrad des Elektrolyseurs

4. Auf Basis der Energievorschrift der Siedlung sind mittels Solarzellen 14 % der erforderlichen elektrischen Leistung zu decken. Berechnen Sie, welche Fläche A an Solarzellen benötigt wird. Gehen Sie davon aus, dass pro Quadratmeter Solarzellenfläche eine Leistungsabgabe von 800 Watt erzielt wird.

$$P_{\text{Solar,ab}} = 0,14 \cdot 886,15 \text{ kW} = 124,06 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{Solar}} = \frac{P_{\text{Solar,ab}}}{P_{\text{Solar,zu}}} = 15 \%$$

$$P_{\text{Solar,zu}} = \frac{P_{\text{Solar,ab}}}{\eta_{\text{Solar}}} = 827,07 \text{ kW}$$

$$\text{Der Dreisatz liefert das Ergebnis: } \frac{A}{827,07 \text{ kW}} = \frac{1 \text{ m}^2}{800 \text{ W}}$$

$$\text{Benötigte Fläche an Solarzellen: } A = 1033,84 \text{ m}^2$$

Anmerkungen:  $\eta_{\text{Solar}} \triangleq$  Wirkungsgrad der Solarzellen

5. Auf Basis der Energievorschrift der Siedlung sind mittels eines kleinen Wasserkraftwerks 60 % der erforderlichen elektrischen Leistung zu decken. Berechnen Sie, wie groß die Fallhöhe h des Wassers auf die Turbine sein muss.

$$\text{Gegebene Kennwerte: } \dot{V}_{\text{Fluss}} = 40 \frac{\text{m}^3}{\text{s}}, \rho_{\text{Wasser}} = 1000 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}, g = 9,81 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$$

$$P_{\text{Wasserkraft,ab}} = 0,60 \cdot 886,15 \text{ kW} = 531,69 \text{ kW}$$

$$\eta_{\text{Wasserkraft}} = \frac{P_{\text{Wasserkraft,ab}}}{P_{\text{Wasserkraft,zu}}} = 80 \%$$

$$P_{\text{Wasserkraft,zu}} = \frac{P_{\text{Wasserkraft,ab}}}{\eta_{\text{Wasserkraft}}} = 664,61 \text{ kW}$$

$$P_{\text{Wasserkraft,zu}} = \dot{V}_{\text{Fluss}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g \cdot h$$

$$\text{Umstellen und Einsetzen liefert: } h = \frac{P_{\text{Wasserkraft,zu}}}{\dot{V}_{\text{Fluss}} \cdot \rho_{\text{Wasser}} \cdot g} = 1,69 \text{ m}$$

Anmerkungen:  $\dot{V}_{\text{Fluss}} \triangleq$  Volumenstrom des Flusses

$\rho_{\text{Wasser}} \triangleq$  Dichte des Wassers

$g \triangleq$  Erdbeschleunigung

$\eta_{\text{Wasserkraft}} \triangleq$  Wirkungsgrad des Wasserkraftwerks

6. Auf Basis der Energievorschrift der Siedlung sind mittels einer Windkraftanlage 26 % der erforderlichen elektrischen Leistung zu decken. Berechnen Sie, welche Länge die Rotorblätter der Windkraftanlage haben müssen.

Gegebene Kennwerte:  $v_{Wind} = 5 \frac{m}{s}$ ,  $\rho_{Luft} = 1,184 \frac{kg}{m^3}$

$$P_{Windkraft,ab} = 0,26 \cdot 886,15 \text{ kW} = 230,40 \text{ kW}$$

$$\eta_{Windkraft} = \frac{P_{Windkraft,ab}}{P_{Windkraft,zu}} = 40 \%$$

$$P_{Windkraft,zu} = \frac{P_{Windkraft,ab}}{\eta_{Windkraft}} = 576,00 \text{ kW}$$

$$P_{Windkraft,zu} = \frac{1}{2} \cdot \rho_{Luft} \cdot \pi \cdot r_{Rotor}^2 \cdot v_{Wind}^3$$

$$\text{Umstellen und Einsetzen liefert: } r_{Rotor} = \sqrt[3]{\frac{2 \cdot P_{Windkraft,zu}}{\rho_{Luft} \cdot \pi \cdot v_{Wind}}} = 49,78 \text{ m}$$

Anmerkungen:  $\rho_{Luft} \triangleq$  Dichte der Luft

$r_{Rotor} \triangleq$  Radius des Rotors bzw. Länge der Rotorblätter

$v_{Wind} \triangleq$  Windgeschwindigkeit

$\eta_{Windkraft} \triangleq$  Wirkungsgrad der Windkraftanlage

7. Gehen Sie davon aus, dass die Solar- und Windkraftanlage nachts nicht genutzt werden kann. Lässt sich die erforderliche elektrische Leistung durch das kleine Wasserkraftwerk decken? Verfahren Sie analog zu dem vorherigen Rechenschema.

$$P_{Nacht} = P_{B,elektrisch} = 75,19 \text{ kW}$$

$$\dot{V}_{H2} = \frac{P_{B,elektrisch}}{H_{H2} \cdot \eta_B} = 0,014 \frac{m^3}{s}$$

$$P_{E,elektrisch} = \frac{\dot{V}_{H2} \cdot H_{H2}}{\eta_E} = 193,85 \text{ kW}$$

Die erforderliche elektrische Leistung kann durch das Wasserkraftwerk vollständig gedeckt werden.

## 6.4 Literaturangaben

Dreer, Silvia: E-Learning an berufsbildenden Schulen. Möglichkeiten zur Förderung des selbstgesteuerten Lernens. Boizenburg: Verlag Werner Hülsbusch 2008.

Eichlseder, Helmut; Klell, Manfred: Wasserstoff in der Fahrzeugtechnik. Erzeugung, Speicherung, Anwendung. Wiesbaden: Vieweg+Teubner 2008.

Ferdinand, Peter: Selbstgesteuertes Lernen in den Naturwissenschaften. Eine Interventionsstudie zu den kognitiven und motivationalen Effekten eines Blended Learning Ansatzes. Hamburg: Verlag Dr. Kovač 2007.

Geitmann, Sven: Wasserstoff & Brennstoffzellen. Die Technik von morgen. Oberkrämer: Hydrogeit 2004.

Gossen, Frank: Brennstoffzellenfahrzeuge im Vergleich zu weiterentwickelten konventionell angetriebenen Fahrzeugen. Aachen: Forschungsgesellschaft Kraftfahrwesen 2000.

Kattentidt, Björn: Entwicklung eines elektrischen Antriebssystems mit Brennstoffzelle für Personenkraftwagen. Aachen: Shaker 2003.

Marx, Johannes: Motivationale Aspekte beim E-Learning. Theoretische Ansätze und Hinweise für die Praxis zur Motivation für das Lernen mit dem Computer und im Internet. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller 2007.

Meier, Rolf: Praxis E-Learning. Grundlagen, Didaktik, Rahmenanalyse, Medienauswahl, Qualifizierungskonzept, Betreuungskonzept, Einführungsstrategie, Erfolgssicherung. Offenbach: Gabal 2006.

Moriz, Werner: Blended-Learning. Entwicklung, Gestaltung, Betreuung und Evaluation von E-Learningunterstütztem Unterricht. Norderstedt: Books on Demand 2008.

Naunin, Dietrich u. a.: Hybrid-, Batterie- und Brennstoffzellen-Elektrofahrzeuge. Technik, Strukturen und Entwicklungen. 3. Auflage. Renningen: Expert 2004.

Obrist, Markus: Methoden des Blended Learning. Überblick und Softwareevaluation. Saarbrücken: VDM Verlag Dr. Müller 2007.

Sauter, Annette; Sauter, Werner; Bender, Harald: Blended Learning. Effiziente Integration von E-Learning und Präsenztraining. München: Luchterhand 2004.

Tiemeyer, Ernst: E-Learning in der beruflichen Bildung. Technologien, Einsatzszenarien, E-Learning-Didaktik. Braunschweig: Winklers 2005.

Voigt, Cornelia; Höller, Stefan; Küter, Uwe: Brennstoffzellen im Unterricht. Grundlagen, Experimente, Arbeitsblätter. 3. Auflage. Oberkrämer: Hydrogeit 2008.

von Unwerth, Thomas: Brennstoffzellen und Brennstoffzellensysteme (Skript des Instituts für Turbomaschinen und Fluid-Dynamik der Universität Hannover).